



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**POKROČILÉ INTERFEROMETRICKÉ
METODY PRO SOUŘADNICOVÉ
ODMĚŘOVÁNÍ**

ADVANCED INTERFEROMETRIC METHODS OF COORDINATES MEASUREMENT

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

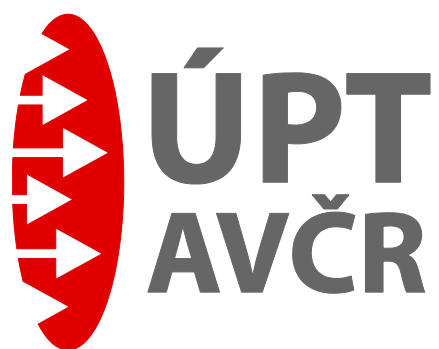
Mgr. Miroslava Holá

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Lazar, Ph.D.

BRNO 2017



Tato disertační práce byla vypracována

**v Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.,
oddělení Koherenční optiky,**

pod vedením Prof. Ing. Josef Lazar,

Abstrakt

Disertační práce tematicky spadá do oborů Metrologie délky a Nanometrologie. Nanometrologie se zabývá dimenzionálním měřením mikro a nanostruktur s vysokým prostorovým rozlišením, typicky v řádu nanometrů. Rozvoj tohoto oboru souvisí s rozvojem nanotechnologií, kde se uplatňují měřicí metody kombinující zobrazování pomocí mikroskopických technik s odměřováním s rozlišením a přesností na nanometrové úrovni. K měření rozměrů nanostruktur se zde využívá laserová interferometrie, která je v současné době nejpřesnější měřicí technikou dimenzionálních veličin. Požadavky měření na nanometrové úrovni vedou ke snahám posouvat limity interferometrického rozlišení a přesnosti. Interferometrické odměřování je v přesnosti měření limitováno především vlivem indexu lomu vzduchu. V první části práce je uveden teoretický rozbor jednotlivých částí laserového interferometru.

Druhá část práce je věnována problematice vlivu indexu lomu vzduchu na interferometrické odměřování a výslednou nejistotu měření. Experimentálně ověřuji koncept kompenzace vlivu indexu lomu vzduchu pomocí stabilizace vlnové délky laserového zdroje na mechanickou referenci. V prvním případě se jedná o interferometr se stojatou vlnou vybuzenou v pasivním rezonátoru s odměřováním polohy pomocí unikátního transparentního fotodetektoru, který je schopen detekovat interferenční maxima a minima podél osy svazku v rezonátoru. Dále demonstruji experimentální měřicí sestavu, jejíž předností je sloučení interferometru a refraktometru do jednoho systému. Toto uspořádání eliminuje zdroje chyb způsobené růzností poloh svazku měřicího index lomu (refraktometr) a svazku měřicího vzdálenost (interferometr). Experimentální sestava je využita ke studiu chování proudění vzduchu (okolního prostředí) v závislosti na změně délky měřicích ramen interferometrů. Toto studium je prováděno s důrazem na potenciální aplikace v souřadnicových měřicích systémech v metrologii délky. Stabilizace vlnové délky na mechanickou referenci představuje snížení příspěvku vlivu indexu lomu vzduchu do celkové nejistoty měření o jeden až dva řády. Na základě získaných výsledků navrhuji nová uspořádání interferometrů pro odměřování polohy, kombinující délkovou interferometrii a tracking refraktometr pro on-line kompenzaci fluktuací indexu lomu vzduchu s blízkými svazky.

Ve třetí části práce popisuji realizaci interferometrických systémů pro konkrétní aplikace. Pro průmyslové prostředí je určen koncept interferometrické délkové sondy, která umožňuje nanometrové odměřování pomocí zjednodušené konstrukce interferometru. Pro souřadnicové odměřování polohy vzorku až v šesti stupních volnosti jsem realizovala kompaktní modulární interferometrický systém, který je unikátní optickou částí a stabilizovaným laserovým zdrojem. Pro odměřování polohy vzorku v komoře

elektronového litografu jsem navrhla a realizovala diferenční interferometr, který pracuje v blízké infračervené oblasti a využívá novou detekční metodu, která byla vyvinuta pro tento systém.

Ve čtvrté části uvádím realizaci vysokorychlostního interferometru v diferenčním uspořádání, který umožňuje vyhodnocení vysokocyklové únavy v materiálovém inženýrství. Tento způsob studia vysokocyklové únavy by měl být přínosem jak pro základní výzkum, tak i inženýrskou praxi.

Klíčová slova

laserová interferometrie, index lomu vzduchu, metrologie délky, nanometrologie, souřadnicové odměřování

Abstract

This thesis addresses particular topics in the field of the length metrology for nanometrology. Nanometrology deals with dimensional measurements of micro- and nanostructures with a high spatial resolution. It typically combines a microscope imaging with a precise coordinate measurement, usually capable of nanometre resolution using the state-of-art laser interferometry techniques. The development in this field is driven, among others, by emerging advanced nanotechnologies that demand to push further the capabilities and limits of the interferometric techniques to make the nanometre-level dimensional measurement of nanostructures possible. The principal limitations of current systems are the environmental conditions and especially the fluctuations in the refractive index of air. The theoretical part of this thesis aim at analysis of individual parts of laser interferometer. I oriented myself on the study of their advantages/disadvantages and further also the possibilities of their industrial applications.

The second part of the thesis presents my work that focused on the influence of the refractive index of air (RIA) on the measurement uncertainty. I experimentally demonstrated an interferometric system with a self-cancellation RIA fluctuations: a transparent photodetector is used for the measurement of the standing wave along the axis of a passive resonator, where the resonator also serves as a reference for the laser wavelength stabilisation.

Another optical arrangement, based on a setup of several Michelson interferometers, represents a combination of an interferometer and a refractometer into a single system. This setup was used to study the behaviour of the ambient airflow with respect to the optical path difference and physical separation of the interferometer's and refractometer's path. Based on the experimental results I proposed new arrangements for shape measuring interferometers, which combine length interferometry and a tracking refractometer for the direct compensation of RIA fluctuations with geometrically adjacent optical beams. The results indicate an improvement in RIA fluctuation induced uncertainty by a factor of 100.

Third part describes the design and implementation of interferometric systems for specific applications. For the industrial environment I developed a compact interferometric displacement gauge which is designed to allow nanometre level measurement using a simplified interferometer construction. For coordinate measurement of the position of the sample up to six degrees of freedom, I realised a compact modular interferometric system, which represents a unique setup together with a stabilised laser source. To measure the position of the sample in an electron beam writer chamber, I designed and implemented a differential interferometer that works in the near infrared domain and uses a new detection method developed for this system.

In the fourth part I describe the realisation of a high-speed interferometer with a differential arrangement, which allows evaluation of high-cycle fatigue in material engineering. This method of studying high-cycle fatigue should be beneficial for both the basic research and the engineering practice.

Keywords

laser interferometry, refractive index of air, metrology of length, nanometrology

Bibliografická citace

HOLÁ, Miroslava. *Pokročilé interferometrické metody pro souřadnicové odměřování*. Brno, 2017. 110 s. Disertační práce. Ústav fyzikálního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Josef Lazar, Dr.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci *Pokročilé interferometrické metody pro souřadnicové odměřování* vypracovala samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně dne 12. 9. 2017

.....

Mgr. Miroslava Holá

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala celému týmu Koherenční optiky Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., za přátelské pracovní podmínky a pomoc při řešení odborných problémů. Upřímné poděkování patří vedoucímu disertační práce prof. Ing. Josefu Lazarovi, Dr., jednak za poskytnutí příležitosti působit na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. a také za vedení disertační práce. Dále bych chtěla poděkovat svým nejbližším kolegům Janu Hrabinovi za pomoc, podporu a cenné rady a Ing. Jiřímu Krškovi za předání rad a zkušeností z jeho dlouholeté praxe. Díky patří také kolegům Martinu Šarbortovi, Šimonu Řeřuchovi a Martinu Čížkovi, že si ve svém nabitém programu našli čas na přečtení mé disertační práce.

Můj velký dík patří také rodině a přátelům za podporu, pomoc a toleranci, díky níž jsem mohla disertační práci dokončit. Práce byla podporována granty Technologické agentury ČR reg. čísla: TE01020233 a TA02010711.

Obsah

KAPITOLA 1	11
1 ÚVOD	11
1.1 Úvod do problematiky disertační práce	11
1.2 Obecné cíle a struktura práce	13
KAPITOLA 2	14
2 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU – VLIV NA NEJISTOTU MĚŘENÍ A MOŽNOSTI VYUŽITÍ V PRŮMYSLU	14
2.1 Laserový zdroj	14
2.2 Optická část interferometru	15
2.3 Detekce a zpracování interferenčního signálu	16
2.4 Vliv prostředí na výslednou nejistotu měření	17
2.5 Využití laserového interferometru v průmyslových aplikacích	19
2.6 Specifické cíle práce	20
KAPITOLA 3	22
3 NOVÉ INTERFEROMETRICKÉ METODY PRO SOUŘADNICOVÉ ODMĚŘOVÁNÍ	22
3.1 Interferometr se stojatou vlnou – měření polohy uvnitř Fabryova- Perotova rezonátoru	22
3.1.1 Vývoj transparentního fotodetektoru	23
3.1.2 Experimentální sestava Fabryova-Perotova rezonátoru s transparentním fotodetektorem	24
3.1.3 Výsledky detekce stojaté vlny	27
3.2 Laserový interferometr – studium chování proudění vzduchu	30
3.2.1 Experimentální sestava kombinující Michelsonův interferometr s refraktometrem	30
3.2.2 Výsledky měření rychlých změn indexu lomu vzduchu – změna délky měřicího ramene	32
3.2.3 Protiběžný interferometr	35
3.2.4 Výsledky měření rychlých změn indexu lomu vzduchu – změna rozteče dvou měřicích svazků	36

3.3	Návrh konfigurací interferometrů pro kompenzaci indexu lomu v souřadnicovém odměřování.....	39
3.3.1	Návrh optického uspořádání interferometru pro měření z vnitřní strany vzorku.....	41
3.3.2	Ověření funkce optické sestavy interferometru pro měření z vnitřní strany vzorku	42
3.3.3	Návrh optické sestavy interferometru pro měření z vnější strany vzorku.....	43
3.3.4	Uspořádání experimentální sestavy interferometru pro měření z vnější strany vzorku.....	46
3.3.5	Výsledky měření	47
KAPITOLA 4.....		50
4	APLIKOVANÝ VÝZKUM V RÁMCI PROJEKTU S PRŮMYSLOVÝM PARTNEREM	50
4.1	Optický kalibrační délkový snímač	50
4.1.1	Princip optického kalibračního délkového snímače.....	51
4.1.2	Specifikace použitých optických prvků a laserového zdroje	52
4.1.3	Postupný vývoj optického kalibračního délkového snímače	53
4.1.4	Experimentální ověření funkce a detekční techniky	54
4.2	Vývoj přesných interferometrických systémů pro dimenzionální metrologii a nanometrologii	56
4.2.1	Základní optické konfigurace interferometrů.....	56
4.2.2	Modulární interferometrický odměřovací systém.....	59
4.2.3	Realizace interferometrického systému pro souřadnicové odměřování.....	60
4.2.4	Instalace kompaktní interferometrické jednotky do systému pro odměřování v šesti stupních volnosti	62
4.2.5	Požadavky na souřadnicové odměřování	63
4.3	Diferenční interferometr pro odměřování polohy vzorku v komoře elektronového litografu.....	65
4.3.1	Dlouhodobé měření mechanické stability komory litografu.....	65
4.3.2	Optická sestava diferenčního interferometru	68
4.3.3	Ověření funkce interferometru	69
4.3.4	Chování laserového zdroje a testování detekčního systému	70
4.3.5	Nová metoda detekce interferenčního signálu	72
4.3.6	Montáž interferometru a instalace do komory elektronového litografu	75
KAPITOLA 5.....		79

5	UPLATNĚNÍ A VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ APLIKOVANÉHO VÝZKUMU.....	79
5.1	Měření vibrací pomocí diferenčního interferometru	79
5.1.1	Diferenční uspořádání interferometru	79
5.1.2	Detekční systém s velkou šířkou pásma	81
5.1.3	Experimentální ověření principu diferenčního interferometru s velkou šířkou pásma	82
5.1.4	Realizace odrazných ploch.....	84
5.1.5	Kompaktní diferenční interferometr	85
	KAPITOLA 6.....	89
6	SHRNUTÍ	89
6.1	Hlavní výsledky disertační práce.....	90
	Použitá literatura	92
	Seznam obrázků	97
	Seznam tabulek	102
	Seznam použitých symbolů a zkratk	103
	PŘÍLOHA 1 – Seznam vlastních publikací	108

KAPITOLA 1

1 ÚVOD

1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY DISERTAČNÍ PRÁCE

V metrologii (vědě o měření) se role světla jako nástroje pro měření začala uplatňovat s novou definicí jednotky délky metru, která byla přijata v roce 1983 na mezinárodní konferenci CGPM (Conferéce Générale des Poids et Mesures) – 1 metr je definován jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za časový interval $1/299\,792\,458\text{s}$ [1]. Podle definice však reálně přímo měřit nelze, její smysl lze chápat s následující návazností: rychlost světla je konstantou nezatíženou nejistotou a jednotka času vstupující do definice určuje návaznost na definici času. Veličinou použitelnou k reálnému měření délky je vlnová délka světla. Ve vakuu je vlnová délka světla přes rychlost šíření vázaná na optický kmitočet (převrácená hodnota periody). Vlnová délka je etalonem, který již slouží ke skutečnému odměřování.

Systémy používané v praxi a umožňující nejpřesnější měření vzdáleností (resp. dimenzionálních veličin) s rozlišením měření v řádu jednotek nanometrů i lepším se nazývají laserové interferometry. Tyto systémy jsou založeny na principu interference světla, kdy lze odpočítáváním příslušného počtu délkových kvant (elementárních vlnových délek) změřit rozměry makroskopických objektů reálného světa. Omezením schopnosti interference je koherenční délka použitého zdroje, která však u vysoce koherentních laserů používaných v metrologii není pro praktická měření limitujícím faktorem. Omezujícím faktorem vázaným na celkový rozsah měření je nejistota optické frekvence laseru a vliv nehomogenity prostředí, nejčastěji vzduchu, který ovlivňuje rychlost šíření světla a tím přepočet optické frekvence na vlnovou délku [2]. Optickou frekvenci laserového zdroje je možné řídit pomocí vhodné metody pro frekvenční stabilizaci laseru [3]. Příspěvek nejistoty daný změnami indexu lomu prostředí lze eliminovat umístěním zařízení do stabilního prostředí (vakuum), případně vhodným uspořádáním optických měřicích tras interferometru.

Základní výzkum týkající se metrologie délky je v posledních letech ovlivněn rychle se rozvíjejícím oborem nanometrologie – měření nanostruktur – který se zabývá problematikou měření dimenzionálních veličin s vysokým prostorovým rozlišením,

typicky v řádu nanometrů. Tento obor souvisí s rozvojem např. polovodičového průmyslu, elektronové litografie a mikroskopických technik s vysokým rozlišením.

Na poli interferometrie se jedná především o vylepšování interferometrických měřicích technik s cílem zlepšit zvláště rozlišení. V případě prostého počítání interferenčních maxim je limitem rozlišení jedna elementární vlnová délka použitého záření (pro viditelné světlo tedy cca 0,5 mikrometru), což je v případě měření nanostruktur nedostatečné. Snažení je tedy soustředěno na to, jak nejlépe rozdělit a rozlišit členění této elementární délky [4].

Další úsilí se zaměřuje na eliminaci rušivých vlivů způsobených mechanickou nestabilitou systému a snížení nejistoty způsobené vlivem indexu lomu prostředí a následnou aplikací interferometrických odměřovacích systému do průmyslového prostředí. S tímto souvisejí snahy týkající se vývoje komplexních interferometrických odměřovacích systémů umožňujících jak jednoosé, tak i víceosé odměřování polohy (vzdálenosti).

Předkládaná disertační práce spadá do oboru metrologie délky a je výsledkem výzkumu, kterým se zabývám na oddělení Koherenční optiky Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

1.2 OBECNÉ CÍLE A STRUKTURA PRÁCE

Disertační práce se zaměřuje na měření délek pomocí laserové interferometrie orientující se na víceosé souřadnicové měřicí systémy.

Hlavní cíle disertační práce reflektují aktuální požadavky na tyto měřicí interferometrické systémy. Obecně je práce zaměřena na návrh, realizaci a funkční ověření několika konfigurací interferometru pro dílčí úlohy z oblasti základního i aplikovaného výzkumu.

V části zaměřené na základní výzkum je práce věnována vlivu indexu lomu prostředí na interferometrická měření a jeho kompenzaci. Prvním dílčím cílem týkajícím se této problematiky je ověření konceptu interferometru se stabilizací vlnové délky měřících optických svazků na mechanickou referenci a s tím související vývoj speciálního transparentního fotodetektoru. Druhým cílem je zkoumání chování proudění vzduchu během interferometrického měření a následné vyhodnocení změny indexu lomu prostředí v závislosti na změně délky měřících ramen interferometru. Výsledkem těchto měření je návrh nových interferometrických sestav eliminujících vliv indexu lomu prostředí na výslednou nejistotu měření.

V aplikačně zaměřené části je cílem realizace několika interferometrických odměřovacích systémů, které vznikly na základě potřeb průmyslových partnerů:

- Sestava optického kalibračního délkového snímače pro průmyslové využití.
- Modulární interferometrický systém pro odměřování v nanotechnologiích a jeho využití např. v národním nanometrologickém etalonu.
- Systém pro dvouosé odměřování polohy stolku se vzorkem v komoře elektronového litografu.
- Systém diferenčního měření s velkou šířkou pásma pro vyhodnocení vysokocyklové únavy v materiálovém inženýrství.

Text disertační práce je strukturován následovně:

Kapitola 2 shrnuje teoretická a praktická východiska potřebná pro tuto práci. Obsahuje obecný principiální rozbor jednotlivých částí měřících systémů založených na laserové interferometrii a analyzuje funkční omezení související s výslednou nejistotou interferometrického měření. V posledním odstavci jsou specifikovány jednotlivé cíle práce.

V kapitole 3 se věnuji problematice fluktuací indexu lomu prostředí a jeho kompenzaci. Na základě získaných výsledků zde navrhuji nové interferometrické sestavy.

Kapitola 4 je věnována návrhu a realizaci různých konfigurací interferometrických odměřovacích systému a jejich následnému využití jak v laboratorních podmínkách, tak i v průmyslových aplikacích.

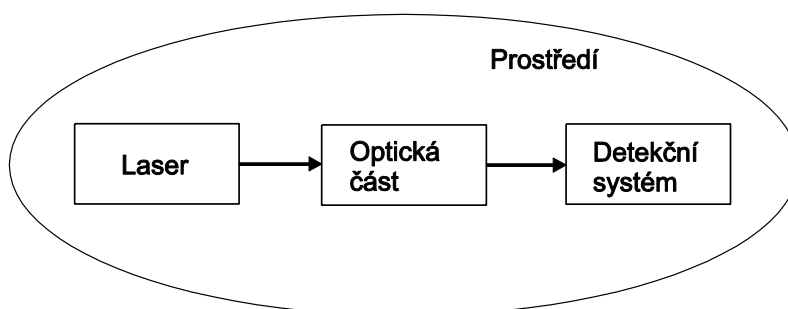
V kapitole 5 zmiňuji ne zcela standardní aplikaci využívající interferometrické odměřování – měření vysokocyklové únavy vzorků kovů.

Poslední kapitola shrnuje výsledky a přínos disertační práce.

KAPITOLA 2

2 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU – VLIV NA NEJISTOTU MĚŘENÍ A MOŽNOSTI VYUŽITÍ V PRŮMYSLU

Laserový interferometr se v principu skládá ze tří částí: laserového zdroje, optické části a detekčního systému, jak je naznačeno na obr. 2.1.1. Prostředí, ve kterém je laserový interferometr instalován a ve kterém probíhá měření lze považovat za jeho čtvrtou součást. Hodnota výsledné nejistoty měření je ovlivněna frekvenční stabilitou laserového zdroje, přesností výroby optických prvků, mechanickou stabilitou celého systému a nehomogenitami prostředí.



Obr. 2.1.1: Schematické znázornění základních částí laserového interferometru ovlivňujících výslednou nejistotu měření

2.1 LASEROVÝ ZDROJ

Interferometry pro měření délky nejběžněji používají jako zdroj záření jednomodový helium-neonový laser (He-Ne laser). Ten zajišťuje dostatečnou primární stabilitu optické frekvence, přiměřeně nízký šum, má jednoduchou konstrukci, dobré optické parametry výstupního svazku a relativně nízkou pořizovací cenu. Výstupní optický výkon okolo 1 mW postačuje pro napájení omezeného počtu měřicích os, obvykle ne více než tří. Stabilizace optické frekvence He-Ne laseru je založena na principu dopplerovsky rozšířeném profilu zisku neonu [5] a umožňuje dosažení stability v řádu 10^{-8} . Dalším běžným zdrojem pro interferometrii je pevnolátkový Nd:YAG laser se zdvojnásobením optického kmitočtu (např. viz [6]). Tento typ laseru dokáže v jednofrekvenčním režimu

pracovat s výstupním výkonem stovek mW. Je jím tedy možno napájet i složitější interferometrické sestavy s více měřicími osami, případně lze využít optovláknový rozvod laserového záření (který znamená větší ztráty ve srovnání s volnou optikou).

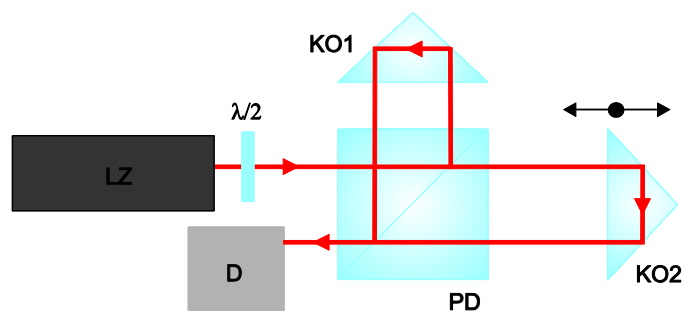
Nadějnou alternativou zdrojů záření pro interferometrické sestavy jsou moderní typy laserových diod např. typu DBR (*Distributed Bragg Reflector Laser*) a DFB (*Distributed Feedback Laser*) [7]. Ty nabízejí jednofrekvenční režim s úzkou šířkou spektrální čáry, mohou pracovat jak ve viditelné, tak infračervené (IR) části optického spektra a disponují výstupními výkony v řádu jednotek až desítek mW. Tyto laserové diody umožňují realizaci velmi kompaktních a robustních systémů. Díky snadnému způsobu modulace intenzity a optického kmitočtu lze s nimi realizovat například sofistikované detekční techniky [8].

Metrologická návaznost měření na primární etalon délky bývá zajištěna frekvenční stabilizací laserového zdroje na vybranou referenci optického kmitočtu metodami laserové spektroskopie [9]. Jako absorpční médium se ve viditelné části spektra nejčastěji používá molekulární jód, v infračervené oblasti páry alkalických kovů (cesium, rubidium) nebo organické sloučeniny (acetylen, metan). Tyto techniky vychází přímo z „Doporučení pro realizaci základních standardů délky 1 metr“ vydaných Mezinárodním úřadem pro míry a váhy BIPM (*Bureau international des poids et mesures*) [10]. Absorpční plyny jsou plněny do absorpčních skleněných kyvet umístěných přímo v sestavách těchto laserových zdrojů. Oddělení Koherenční optiky Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. (ÚPT) patří ve vývoji a konstrukci těchto referencí k absolutní světové špičce. Nejlepší frekvenční stabilita konvenčního laserového zdroje byla dosažena v kombinaci frekvenčně zdvojnásobeného Nd:YAG laseru a metody saturované spektroskopie v molekulárním jódu, s relativní stabilitou mezi hodnotami 10^{-14} – 10^{-15} [11].

2.2 OPTICKÁ ČÁST INTERFEROMETRU

Optická část laserového interferometru tvoří další důležitou součást celého systému. Z různých známých konfigurací interferometrů [12] se pro délková měření nejčastěji používá Michelsonův interferometr s pevnou referenční a posuvnou měřicí větví s koutovými hranoly, které (na rozdíl od rovinných zrcadel) eliminují malé úhlové odchylky. Posun měřicí větve interferometru způsobuje změnu vzájemné fáze mezi referenční a měřicí vlnou vystupující z optické části interferometru. Tuto fázovou změnu lze vyhodnotit pomocí vhodné detekční techniky a tak určit výslednou změnu délky v měřicím rameni interferometru.

Základní rozlišení této konfigurace interferometru, znázorněné na obr. 2.1.2., je $\lambda/2$, kde λ je vlnová délka použitého laserového zdroje, přičemž rozlišení lze zvýšit zvýšením počtu průchodů měřicího svazku. Přesnějšího rozlišení se dosahuje pomocí tzv. detekčních technik, uvedených v následující kapitole, které umožňují rozlišit fázový posun o několik řádů přesněji.



Obr. 2.1.2: Schéma Michelsonova interferometru s koutovými hranoly eliminujícími úhlové odchylky. Toto uspořádání je určeno pro jednoosé měření. Optická vlna vycházející z laserového zdroje (LZ) se dělí na dělicí rovině polarizačního dělicího hranolu (PD). Průběžná optická vlna (měřicí) prochází koutovým hranolem (KO2). Odražená optická vlna (referenční) prochází koutovým hranolem (KO1). Obě vlny se po průchodu příslušnými drahami rekombinují na PD, opouští optickou soustavu a dopadají na detektor (D)

Na celkovou přesnost interferometru a výslednou nejistotu měření má vliv:

- Přesnost výroby jednotlivých optických prvků.
- Kvalita vzájemného stmelení (případně sesátí metodou optického kontaktu).
- Přesnost usazení optických dílů do mechanických konstrukcí.

V případě tmeleného interferometru jsou požadované úhlové chyby a odchylky vstupních a výstupních svazků na úrovni jednotek úhlových vteřin. Je třeba pečlivě dbát na optické a fyzikální vlastnosti použitého optického tmele, zejména s přihlédnutím na předpokládané vlnové délky zdroje a parametry prostředí, v němž se bude interferometr používat (např. vliv různých koeficientů délkové teplotní roztažnosti). V případě sesávaného interferometru, jehož jednotlivé optické části jsou vyrobeny z křemenného skla, je možno úhlové chyby proti tmelenému interferometru mírně eliminovat, jelikož odpadají problémy s homogenitou a dilatací tmele. Po sesátí jednotlivých prvků tvoří optická část interferometru jeden kompaktní celek. Vlepování koutových odražečů i dělicího hranolu se děje za pomoci průchodu laserového svazku a současné kontroly výstupních optických signálů (difrakční kroužky, sesouhlasení odrazů od ploch). Jak volnou optiku, tak i sesávané prvky je v tuzemsku schopna v požadované kvalitě vyrábět a dodávat např. firma Meopta - optika s.r.o. Přerov.

2.3 DETEKCE A ZPRACOVÁNÍ INTERFERENCEČNÍHO SIGNÁLU

Třetí, neméně důležitou částí laserového interferometru je způsob detekce a zpracování interferenčního signálu. Mezi základní používané detekční techniky vyhodnocení interferenční fáze patří homodynní a heterodynní detekce [13]. U homodynní detekce spolu interferují laserové svazky o stejné optické frekvenci. V případě heterodynní detekce spolu interferují laserové svazky s různými optickými frekvencemi a výsledkem není

interferenční vlna s konstantní interferenční fází, ale záznějový kmitočet [14]. Z hlediska složitosti optiky je interferometr s heterodynní detekcí méně náročný než interferometr s homodynní detekcí, ale z hlediska nároků na elektronické zpracování představuje interferometr s heterodynní detekcí velmi náročné zařízení. V současné době jsou jak v průmyslových, tak i ve vědeckých aplikacích používány oba dva způsoby detekce a nelze jednoznačně říci, která z variant detekce je lepší či horší. V obou těchto případech se využívají polarizační prvky separující polarizačně měřicí a referenční větev.

Detekční metoda umožňující vyhodnocení interferenční fáze bez nutnosti mít v interferometru polarizační prvky byla vyvinuta na ÚPT [15]. Jedná se o metodu, kde dochází k detekci kvadrurního signálu pomocí modulační optické frekvence laseru za pomoci např. elektro-optického modulátoru. Tato detekční metoda je schopna nahradit klasickou kvadrurní jednotku vyznačující se složitou a drahou optickou částí následným elektronickým zpracováním detekovaného modulovaného signálu. Další výhodou této detekční techniky je, že není citlivá na změnu polarizace laserového zdroje. Možnou nevýhodou může být nutná modulace laserového zdroje.

2.4 VLIV PROSTŘEDÍ NA VÝSLEDNOU NEJISTOTU MĚŘENÍ

Převážná většina interferometrických měření délek probíhá v atmosférických podmínkách, kde dochází k ovlivnění výsledku měření vlivem fluktuací indexu lomu. Pokud požadujeme rozlišení na nanometrové úrovni, nelze tyto vlivy zanedbat.

Na makroskopické úrovni se vliv atmosféry na šíření laserového svazku studuje například v bezkabelových optických komunikacích [16]. V tomto případě je přenosovým prostředím nejnižší vrstva atmosféry (troposféra). Teoretický model prezentuje nehomogenity v atmosféře jako oblasti/buňky, aproximované kulovým tvarem o různém průměru a indexu lomu, které v různých místech ovlivňují optický svazek různým způsobem (dále v textu je použit pojem buňka). V bezkabelových optických komunikacích dochází vlivem atmosféry k útlumu a k zhoršení přenosových vlastností spoje. Mezi hlavní negativní jevy patří:

- Útlum optické intenzity vlivem absorpce a rozptylu na molekulách a aerosolech [17].
- Fluktuace optické intenzity vlivem působení deště nebo sněhu [18].
- Fluktuace optické intenzity vlivem turbulencí – např. vzdušné víry, vítr [18].
- Přerušování svazku, například letícím ptákem nebo hmyzem.

Z pohledu studia chování proudění vzduchu a jeho vlivu na interferometrické měření jsou nejzajímavější fluktuace optické intenzity vlivem turbulencí atmosféry, kdy dochází k míšení vzduchových mas s rozdílnými indexy lomu. To má za následek odchýlování optického svazku vlivem refrakce a deformaci vlnoplochy. Velikost těchto buněk, jimiž optický svazek prochází, má značný vliv na interakci svazku po průchodu buňkou. Pokud je velikost buňky menší než poloměr laserového svazku, je svazek odkloněn do jiného

směru. Je-li velikost buňky srovnatelná s poloměrem laserového svazku, jeho směr šíření se nemění, pouze dochází ke změně divergence svazku. V případě, že je velikost buňky větší než poloměr laserového svazku, dochází k ohybu a náhodnému šíření svazku.

Popisem atmosférických turbulencí se zabývá Kolmogorova studie [19]. Zde se zaměřují pouze na popis náhodných fluktuací způsobených různým indexem lomu.

V atmosféře se vytvářejí oblasti teplotních nehomogenit, které mají konstantní index lomu. Tyto lokální nehomogenity jsou charakterizovány rozměrem a časovou stálostí. Nehomogenity si lze představit ve tvaru koulí o průměru $l \in (l_0, L_0)$, kde l_0 je minimální průměr koule, L_0 je maximální průměr koule. Průměr těchto koulí se pohybuje řádově od několika milimetrů do jednotek kilometrů.

Nehomogenity (koule) větších rozměrů se rozpadají za kratší dobu a mají charakter mechanického pohybu. Malé nehomogenity (koule) se rozpadají za delší dobu a jsou teplotního charakteru. Hodnota indexu lomu v daném místě je závislá na lokální teplotě, atmosférickém tlaku, hustotě částic a rychlosti větru. Index lomu v prostoru a čase t lze zapsat:

$$n(\mathbf{r}, t) = n_0 + n_1(\mathbf{r}, t), \quad (2.1)$$

kde $n_0 = \langle n(\mathbf{r}, t) \rangle \cong 1$ je střední hodnota indexu lomu a $n_1(\mathbf{r}, t)$ reprezentuje náhodnou odchylku $n(\mathbf{r}, t)$ od střední hodnoty.

Statický charakter indexu lomu je označován jako strukturní funkce indexu lomu D_n :

$$D_n = \langle [n(A, t) - n(B, t)]^2 \rangle, \quad (2.2)$$

kde n je index lomu vzduchu v daném bodě (A resp. B) v čase t . Strukturní funkce indexu lomu souvisí se vzdáleností r bodů A a B dle Kolmogorova modelu:

$$D_n = \begin{cases} C_n^2 r^{2/3} & l_0 \ll r \ll L_0 \\ C_n^2 \cdot l_0^{-4/3} \cdot r^2 & 0 \leq r \ll l_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

kde r je vzdálenost mezi body A a B a C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu $[m^{-2/3}]$. Strukturní parametr lze dát do souvislosti s mírou atmosférických turbulencí v atmosférickém přenosovém prostředí. Z této souvislosti vyplývá, že s rostoucí mírou atmosférických turbulencí roste strukturní parametr indexu lomu.

V bezkabelové optické komunikaci se k potlačení atmosférických vlivů na optických spojích využívá vícesvazkového provozu (více optických zdrojů v jedné hlavici) a také tvarování svazku – „flat-top beam“ (svazek s přibližně konstantním rozložením optické intenzity v okolí osy svazku).

V případě laserové interferometrie lze hodnotu indexu lomu vzduchu stanovit několika přímými a nepřímými metodami. Do přímých metod patří například měření pomocí čerpání kyvet [20], rezonátoru [21–23] nebo optického hřebene [24, 25]. Nepřímé metody využívají empirické rovnice (Edlénova [26], Ciddorova [27,28]), které jsou známy již

desítky let a prošly několika modifikacemi. Hodnota indexu lomu vzduchu je stanovena z parametrů atmosféry – teplota, tlak, relativní vlhkost vzduchu a pro zpřesnění se udávají koncentrace některých plynů, nejčastěji CO₂. Největší vliv na změnu indexu lomu vzduchu má teplota. Změna teploty je více citelná ve vertikální ose, proto se laserové interferometry převážně realizují ve vodorovné poloze a je vhodné, aby laserové svazky byly co nejbližší u sebe. Přesnost nepřímých měření může být v laboratorních podmínkách až na úrovni $3 \cdot 10^{-8}$ [29]. V porovnání s frekvenční stabilitou laserového zdroje, kterou lze pomocí lineární spektroskopie dosáhnout na úroveň i lepší než 10^{-8} , vliv fluktuací indexu lomu vzduchu spolu s vlivem mechanické nestability znamená největší příspěvek nejistoty měření.

Měřením vlivu indexu lomu vzduchu na výslednou nejistotu interferometrického měření a jeho kompenzací se zabývám v kapitole 3.

Pro stanovení změny indexu lomu vzduchu využívám principu stabilizace vlnové délky laserového zdroje na mechanickou referenci, kdy je vlnová délka dána vztahem:

$$\lambda = \frac{L_{const.}}{N}, \quad (2.4)$$

kde $L_{const.}$ je pevná mechanická délka odvozená od mechanické reference, N počet vlnových délek. Optickou frekvenci laserového zdroje lze vyjádřit vztahem:

$$\nu = \frac{1}{n} \left(\frac{c}{\lambda} \right). \quad (2.5)$$

Také používám nepřímou metodu, kdy změnu indexu lomu vzduchu stanovuji pomocí Edlénovy rovnice z měřených parametrů atmosféry. U experimentální sestavy kombinující interferometr a refraktometr studuji chování proudění vzduchu na základě matematického modelu, který se používá na makroskopické úrovni v bezkabelových optických komunikacích a je popsán výše.

2.5 VYUŽITÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU V PRŮMYSLVÝCH APLIKACÍCH

Vzhledem k stále se zvyšujícím požadavkům na přesnost geometrického odměřování v průmyslové praxi, především pak ve strojírenství, dochází postupně k širšímu využití optických měřicích metod. Ty se postupně přesouvají ze stabilních podmínek laboratorního prostředí, kde se využívají například v systémech ke kalibraci etalonů délky mechanických měřidel [30], elektronických snímačů délky [31] nebo v národních etalonech pro nanometrologii [32–34], do průmyslového prostředí.

Na světovém trhu existují společnosti jako například RENISHAW apply innovationTM, SIOS Meßtechnik GmbH, Zygo Corporation nebo SmarAct GmbH, které nabízejí různé konfigurace odměřovacích a kalibračních laserových interferometrických systémů pro

nejrůznější průmyslová odvětví, od leteckého průmyslu až po polovodičový s rozlišením uváděným společnostmi v jednotkách nanometrů.

To neznamená, že na poli výzkumu jsou optické měřicí metody uzavřenou kapitolou. Neustále jsou zvyšovány požadavky na snížení nejistoty měření. To vede k výzkumu v oblasti výroby precizních optických prvků a měření ve více osách s použitím jednoho nízkošumového laserového zdroje o velkém optickém výkonu. Zde dochází ke spolupráci mezi výzkumnými organizacemi a průmyslovými partnery.

V této oblasti spolupracuje oddělení Koherenční optiky Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i, s průmyslovým partnerem například na vývoji optického kalibračního délkového snímače s opakovatelností měření v řádu 1 nm – 10 nm (Kapitola 4, odstavec 4.1), který by se mohl uplatnit v některých aplikacích jako náhrada elektronických délkových snímačů vykazujících opakovatelnost měření 10 nm – 100 nm. Naše spolupráce je i v oblasti vývoje výroby precizních optických prvků, které jsou důležitou součástí laserového interferometru (viz Kapitola 4, odstavec 4.2). S rozvojem nanotechnologií a vytváření nanostruktur souvisí další spolupráce na vývoji souřadnicového odměřovacího systému pro přesné odměřování polohy stolku v elektronovém litografu (viz Kapitola 4, odstavec 4.3). Elektronový litograf (*ELG* – Electron beam pattern generator) je zařízení, které se používá pro zápis mikrostruktur a nanostruktur. Rozlišení v řádu jednotek nanometrů je tedy nutností.

2.6 SPECIFICKÉ CÍLE PRÁCE

Na základě předešlého rozboru metodologie laserové interferometrie a potenciálního využití nejen v základním výzkumu ale i v průmyslových aplikacích jsou cíle disertační práce následující:

- Návrh a experimentální ověření sestavy interferometru se stojatou vlnou vybuzeou v pasivním Fabryově-Perotově rezonátoru. Vývoj a ověření funkce transparentního fotodetektoru. Provedení a vyhodnocení naměřených dat.
- Uspořádání experimentálních sestav kombinujících interferometr a refraktometr. Provedení experimentálních měření a vyhodnocení naměřených dat. Cílem je studium chování proudění vzduchu.
- Návrh, realizace a ověření funkce experimentálních sestav interferometrů pro odměřování z vnitřní a vnější strany vzorku. Provedení série měření a vyhodnocení výsledků s experimentální sestavou pro odměřování z vnější strany.
- Optický kalibrační délkový snímač – spolupráce na postupném vývoji a sestavení experimentálních prototypů snímače.
- Vývoj přesných interferometrických systémů pro dimenzionální metrologii a nanometrologii – výkresová dokumentace k výrobě optických sestav

interferometrů a mechanických klecí, sestavení a otestování funkčního vzorku laserového interferometrického systému.

- Diferenční interferometr pro odměřování polohy vzorku v komoře elektronovém litografu – návrh optické části diferenčního interferometru, sestavení, ověření funkce, instalace a zprovoznění diferenčního odměřování v komoře elektronového litografu.
- Měření vibrací pomocí diferenčního interferometru – sestavení, otestování a instalace diferenčního interferometru do měřicí sestavy.

KAPITOLA 3

3 NOVÉ INTERFEROMETRICKÉ METODY PRO SOUŘADNICOVÉ ODMĚŘOVÁNÍ

Kapitola navazuje na poznatky a výsledky, kterých jsem docílila v rámci řešení bakalářské [35] a diplomové práce [36], kdy pokračuji ve studiu fluktuací indexu lomu vzduchu. Experimentálně ověřuji nové interferometrické metody určené pro souřadnicové odměřování s kompenzací tohoto zdroje nejistoty. Problematika fluktuací indexu lomu prostředí a vliv na interferometrické odměřování byla teoreticky popsána v kapitole 2 odstavci 2.4.

Kapitola obsahuje:

- Interferometr se stojatou vlnou vybuzenou v pasivním Fabryově-Perotově rezonátoru. Využití principu stabilizace vlnové délky na mechanickou referenci – kompenzace fluktuací indexu lomu vzduchu. Odměřování polohy uvnitř dutiny rezonátoru pomocí transparentního fotodetektoru.
- Studium chování proudění vzduchu přes délkový šum v závislosti na posunutí měřicího ramene interferometru.
- Návrhy nových uspořádání interferometrů pro souřadnicové odměřování, které zahrnují kompenzaci fluktuací indexu lomu prostředí.

3.1 INTERFEROMETR SE STOJATOU VLNOU – MĚŘENÍ POLOHY UVNITŘ FABRYOVA-PEROTOVA REZONÁTORU

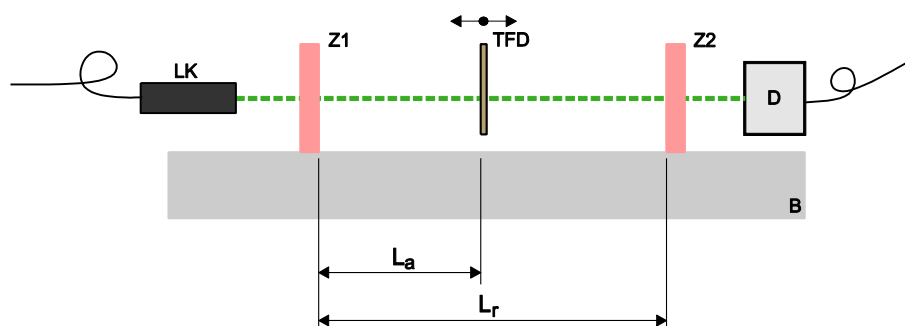
Předkládaný koncept interferometru se stojatou vlnou využívá principu stabilizace vlnové délky zdroje záření na přesnou mechanickou referenci. Tento přístup nahrazuje stabilizaci optické frekvence laseru a následnou konverzi na vlnovou délku prostřednictvím vyhodnocení změny indexu lomu vzduchu. Současné He-Ne laserové zdroje pro interferometrii vykazují relativní stabilitu na úrovni 10^{-8} [37–39]. Tato úroveň je srovnatelná s koeficientem délkové teplotní roztažnosti vysoce stabilních materiálů jako je např. Zerodur od fy. Schott, nebo ULE od fy. Corning.

Koncept interferometru se stojatou vlnou je dobře realizovatelný v pasivním Fabryově-Perotově rezonátoru (F-P rezonátor). F-P rezonátor se tradičně používá jako etalon frekvence stabilizovaných laserů v různých konfiguracích a aplikacích.

Vztažení vlnové délky na mechanickou referenci je dáno stabilizací optické frekvence laseru na rezonanci pasivního F-P rezonátoru, a to buď detekcí rezonančního maxima na výstupu nebo rezonančního minima v odražené vlně. Vlastní odměřování lze realizovat pomocí prvku schopného detekovat maxima a minima stojaté vlny podél osy svazku v rezonátoru [40].

Náhrada konceptu stabilizace optické frekvence s konverzí na vlnovou délku prostřednictvím nepřímého měření indexu lomu nabízí kompenzaci fluktuací indexu lomu. V předem daném měřicím rozsahu (zde daném délkou rezonátoru) je stabilizována vzduchová vlnová délka laseru. Dojde-li ke změně indexu lomu prostředí, vazba laseru na rezonanční maximum rezonátoru bude sledovat v regulační smyčce tuto změnu a vlnová délka v rezonátoru zůstane konstantní se stabilitou odpovídající mechanické stabilitě rezonátoru.

Koncept měření stojaté vlny vytvořené reflektorem byl již dříve popsán [41], zde předkládaný koncept kombinuje měření v dutině rezonátoru spolu se stabilizací vlnové délky, jak je schematicky znázorněno na obr. 3.1.1.



Obr. 3.1.1: Principiální schéma pasivního Fabryova-Perotova rezonátoru s transparentním fotodetektorem (TFD). Stabilizace vlnové délky na mechanickou referenci (B). Celková délka rezonátoru L_r je dána vzájemnou vzdáleností zrcadel Z1, Z2 napevno umístěných na B. Změna vzdálenosti L_a uvnitř dutiny rezonátoru lze detekovat pomocí TFD. LK: laserový kolimátor, D: detektor

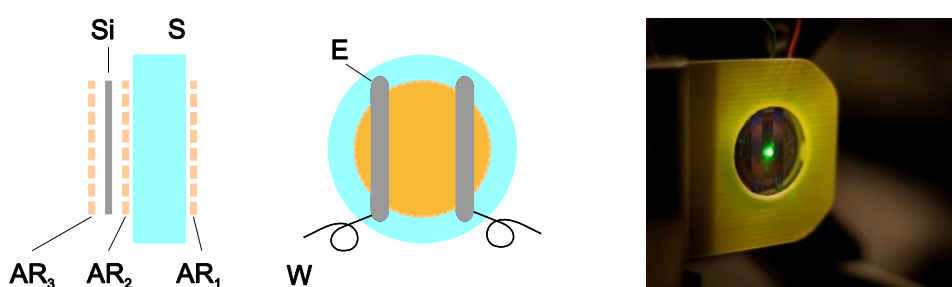
3.1.1 Vývoj transparentního fotodetektoru

Odměřování v dutině pasivního F-P rezonátoru je realizovatelné pomocí transparentního fotodetektoru, který je schopen detekovat maxima a minima stojaté vlny. Při vývoji bylo mým cílem:

- Nalezení rovnováhy mezi ztrátami způsobenými detektorem uvnitř rezonátoru a jeho citlivostí.

- Redukce nežádoucích odrazů od optických ploch fotodetektoru [36, 41].

Základem fotodetektoru je substrát z křemenného skla o průměru 20 mm, tloušťce 0,4 mm s rovinností optických ploch $\lambda/20$. Využitelný průřez fotodetektoru je 3 mm. Na substrátu jsou nanесeny tenké fotorezistivní křemíkové vrstvy s vodivými elektrodami (z jedné strany po obou bocích). Pro snížení odrazivosti detektoru byly na obě strany detektoru nanесeny antireflexní vrstvy (AR vrstvy) optimalizované pro vlnové délky 532 nm a 1064 nm se zbytkovou odrazivostí na úrovni několika desetín procenta. Vrstvy jsou kombinací materiálu TiO_2 a SiO_2 . Propustnost detektoru se pro použítou vlnovou délku 532 nm pohybuje na úrovni 65%. Schéma a fotografie realizovaného fotodetektoru je na obr. 3.1.2.



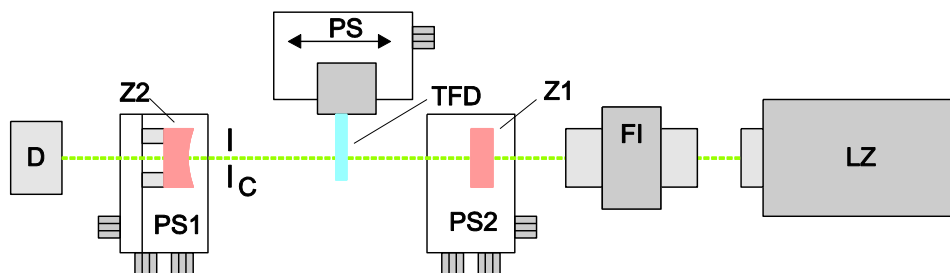
Obr. 3.1.2: Schéma transparentního fotodetektoru (vlevo). Detailní fotografie transparentního fotodetektoru (vpravo). AR: antireflexní vrstvy, Si: křemíková vrstva, S: substrát z křemenného skla, E: titanové elektrody, W: elektrické kontakty

Během vývoje se podařilo otestovat několik variant fotodetektorů a podařilo se vytvořit soustavu AR vrstev a vlastní aktivní vrstvy z polykrystalického křemíku redukující ztráty odrazem na podložce z křemenného skla. Návrh soustavy vrstev a jejich realizaci provedli RNDr. Pavel Pokorný a Mgr. Jindřich Oulehla na ÚPT, nanесení těchto vrstev proběhlo vakuovým napařováním elektronovým svazkem na aparatuře Balzers BAK 550. Na vývoji transparentního fotodetektoru jsem spolupracovala s kolegy z Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, v.v.i (FZÚ), z oddělení Tenkých vrstev a nanostruktur (skupina RNDr. Antonína Fejfara).

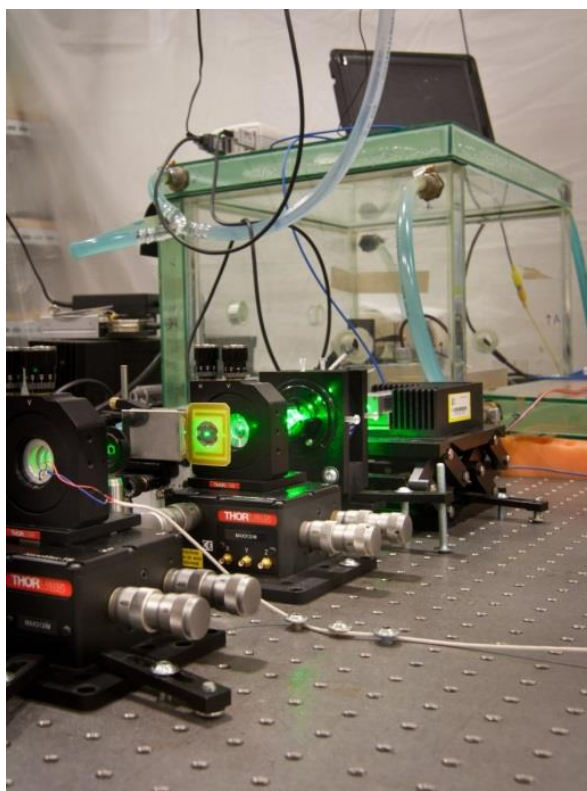
3.1.2 Experimentální sestava Fabryova-Perotova rezonátoru s transparentním fotodetektorem

Při realizaci F-P rezonátoru jsem zvolila rozměry a geometrické parametry na základě koncepce, která se tradičně používá pro (před)stabilizaci laserů Pound-Drever-Hallovou metodou ve fundamentální metrologii délek [42]. Jedná se o ověřenou konfiguraci hemisférického, opticky stabilního rezonátoru. Realizace pro potřeby experimentu využívala stavebnicových komponentů, bez nároků na vysokou mechanickou stabilitu. Cílem snažení bylo prokázat funkčnost principu měření délky ve stojaté vlně a vazby optické frekvence laseru na mechanickou délku rezonátoru.

Rezonátor měl délku 200 mm, zrcadlo $Z1$ rovinné, zrcadlo $Z2$ s poloměrem křivosti 800 mm a propustností přibližně 15%. Jako laserový zdroj jsem použila pevnolátkový Nd:YAG laser se zdvojnásobením optického kmitočtu pracující na vlnové délce $\lambda = 532$ nm. Zrcadla $Z1$, $Z2$ byla nastavitelná pomocí držáků a stavitelných stolků v pěti stupních volnosti. Pomocí těchto pěti stupňů volnosti se podařilo rezonátor naladit do základního módu TEM_{00} . Schéma experimentálního uspořádání pasivního F-P rezonátoru je na obr. 3.1.3. a fotografie experimentální sestavy je na obr. 3.1.4.



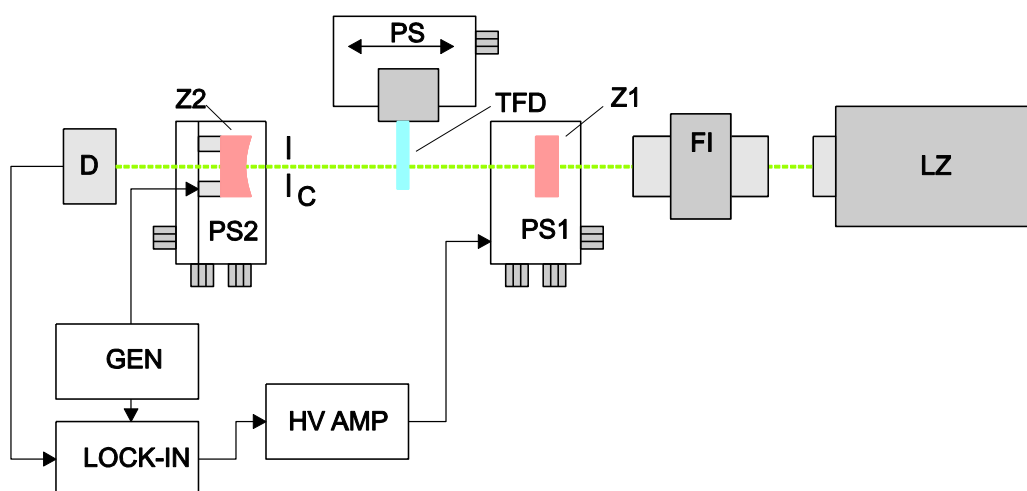
Obr. 3.1.3: Schéma experimentálního uspořádání pasivního F-P rezonátoru s transparentním fotodetektorem (TFD). Optická vlna z laserového zdroje (LZ) prochází Faradayovým izolátorem (FI – zabráňuje zpětným odrazům záření do laseru) a vstupuje do dutiny rezonátoru dané zrcadly $Z1$, $Z2$. Zrcadla $Z1$, $Z2$ jsou stavitelná pomocí stolků s držáky (PS1, PS2) v pěti stupních volnosti. Vystupující optická vlna v módu TEM_{00} vstupuje do detektoru D. Pohyb TFD je zajištěn pomocí stolku s piezoelektrickým posuvem (PS)



Obr. 3.1.4: Fotografie experimentálního uspořádání pasivního F-P rezonátoru s vloženým transparentním fotodetektorem

Pro ověření funkce transparentního detektoru bylo nutné zapojit regulační smyčku, která zajistila pomocí laseru naladění F-P rezonátoru, schematicky znázorněnou na obr. 3.1.5. Princip řízení délky rezonátoru je založen na modulaci délky rezonátoru a synchronní detekci, čímž se rozliší směr případného rozladění vůči centrálnímu maximu. Regulační elektronika zahrnuje kartu generátoru, lock-in kartu (synchronní detektor), *HV AMP* kartu (vysokonapěťový zesilovač a proporcionálně-integrační regulátor (*PI* regulátor)), dva osciloskopy zobrazující stav regulátoru a výstup z transparentního fotodetektoru a fotodetektor s vnitřním předzesilovačem HUV-1100 BG (EG&G).

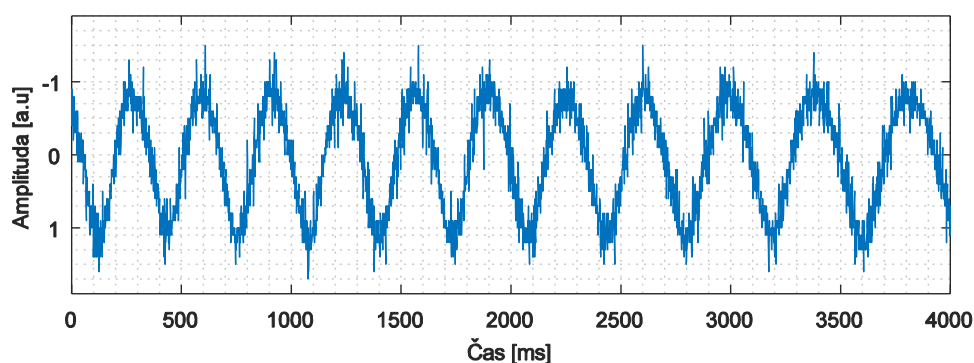
Modulace délky rezonátoru byla realizována na kmitočtu 1 kHz prostřednictvím buzení piezoelementu, který je součástí držáku zrcadla Z2. Signál z detektoru (*D*) byl přiveden na osciloskop a na vstup lock-in zesilovače, stejnosměrný demodulovaný výstup lock-in karty byl pak použit jako vstup pro *PI* regulátor následovaný vysokonapěťovým zesilovačem (*VN* zesilovač). Referenční frekvence lock-in karty byla odvozena od stejného oscilátoru jako modulační signál. Vlastní řízení délky rezonátoru jsem realizovala polohovacím stolem PS1, který byl vybaven piezoelektrickým měničem (*PZT*). Rychlost odezvy tohoto řízení se pohybuje na úrovni stovek až tisíců Hz. Modulační zdvih byl volen přiměřeně malý (v jednotkách MHz), aby se pohyboval jen v malém rozmezí okolí rezonančního maxima.



Obr. 3.1.5: Schéma řízení délky rezonátoru. Řízení délky rezonátoru je založeno na modulaci délky rezonátoru a synchronní detekci. PS1, PS2: polohovací stolek, D: detektor, TFD: transparentní fotodetektor, Z1, Z2: zrcadla, C: clona, FI: Faradayův izolátor, LZ: laserový zdroj, GEN: generátor, LOCK-IN: synchronní detektor, HV AMP: vysokonapěťový zesilovač + proporcionálně-integrační (PI) regulátor

3.1.3 Výsledky detekce stojaté vlny

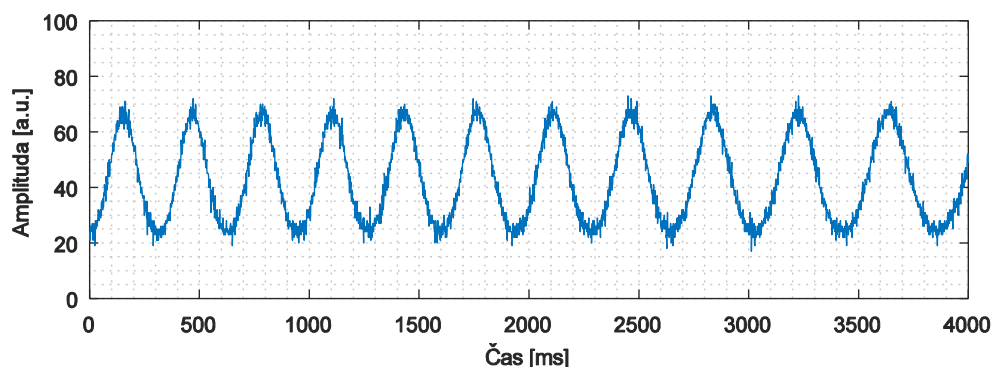
Funkci transparentního fotodetektoru (TFD) jsem ověřila v sestavě F-P rezonátoru se zapojenou regulační smyčkou (viz odstavec 3.1.2). TFD jsem upevnila na stolek s piezoelektrickým posuvem a vložila do dutiny rezonátoru. Pomocí TFD se mi podařilo detekovat maxima a minima stojaté vlny uvnitř dutiny rezonátoru. Časový záznam detekované stojaté vlny pomocí TFD je na obr. 3.1.6 [43].



Obr. 3.1.6: Časový záznam detekované stojaté vlny transparentním fotodetektorem (TFD) při pohybu podél osy laserového svazku v pasivním F-P rezonátoru

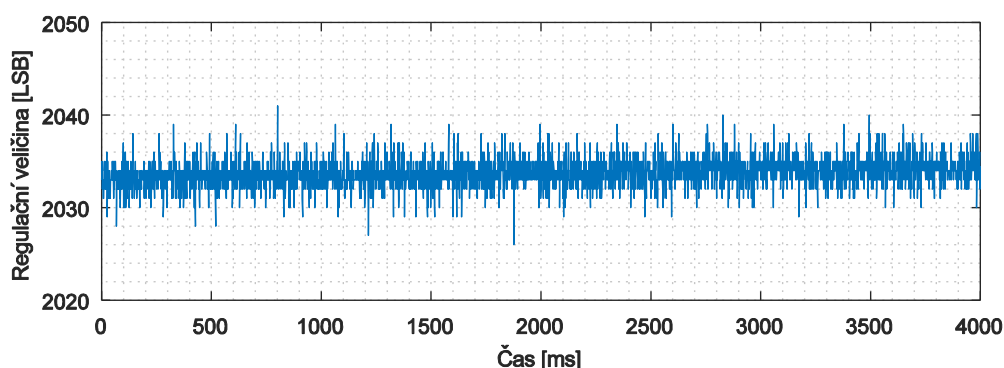
Chování rezonátoru s vloženým transparentním fotodetektorem jsem kontrolovala pomocí detektoru (D) na výstupu ze sestavy. Tento časový záznam je zobrazen na obr. 3.1.7. Délka rezonátoru byla díky stabilizaci vlnové délky laserového zdroje konstantní,

což je patrné na obr. 3.1.8, kde je souběžný záznam regulační veličiny. Ten je zatížen pouze šumem elektroniky. Vložený transparentní fotodetektor nezpůsoboval při pohybu mezi rezonančními maximy a minimy žádné odchylky, které by způsobovaly problémy při stabilizaci optické frekvence laserového zdroje. To je dáno kvalitními AR vrstvami na aktivní ploše fotodetektoru.



Obr. 3.1.7: Časový záznam výstupní optické vlny z F-P rezonátoru detekované detektorem (D)

Záznam intenzity na výstupu rezonátoru snímaném fotodetektorem a určené k odvození regulační veličiny stabilizace vykazuje periodicitu odpovídající pohybu transparentního fotodetektoru. Zřetelně se jedná o stav, kdy se fotodetektor, vnášející do stojaté vlny určité ztráty, nachází v koincidenci s maximem, resp. minimem stojaté vlny. Míra ztrát v rezonátoru se tím periodicky mění a mění se také intenzita záření na výstupu. Pro funkčnost celého systému je klíčové, zda tato periodicitu ovlivňuje stabilizaci optické frekvence laseru na rezonátor. Záznam uvedený na obr. 3.1.8 nic takového nenaznačuje.



Obr. 3.1.8: Časový záznam regulační veličiny laserového zdroje – zatížen pouze šumem elektroniky

Z výsledků vyplývá, že díky realizaci transparentního fotodetektoru je možné interferometr se stabilizací vlnové délky na mechanickou referenci použít pro měření polohy potlačením vlivu indexu lomu vzduchu.

Technika založená na konceptu stabilizace vlnové délky na mechanickou referenci společně se snímáním polohy ve stejné ose svazku představuje nové a koncepčně unikátní řešení interferometrického odměřování délky v jedné ose. Technika, která nabízí potlačení vlivu prostředí, představuje významný krok ke zvýšení přesnosti v dimenzionální metrologii, zejména v nanometrové oblasti. Z veškerých získaných výsledků [37, 38, 43] týkajících se problematiky kompenzace vlivu fluktuací indexu lomu, kde využívám principu stabilizace vlnové délky na mechanickou referenci, vyplývá snížení vlivu indexu lomu vzduchu. Zde prezentovaný koncept odměřování polohy ve stojaté vlně pasivního rezonátoru představuje experimentální ověření principu a použitý transparentní detektor je prvním pokusem a realizací zařízení takového druhu. Šumové poměry v detekci polohy zatím neslibují přesnost na metrologické úrovni, ale prezentované výsledky ukazují funkčnost a použitelnost této nové a unikátní měřicí metody.

3.2 LASEROVÝ INTERFEROMETR – STUDIUM CHOVÁNÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU

V další oblasti výzkumu jsem se zaměřila na studium vlivu proudění vzduchu na nejistotu měření polohy laserovým interferometrem [44]. Cílem těchto měření je ověřit hypotézu, že fluktuace indexu lomu vzduchu se dějí na úrovni pohybu určitých elementárních objemů a mají charakter náhodného procesu. Vycházela jsem z teorie, která je popsána na makroskopické úrovni při šíření optického svazku v bezkabelové komunikaci (viz Kapitola 2, odstavec 2.4) a pokusila jsem se ověřit, zda je tato interpretace použitelná i v malém měřítku u laserových svazků používaných v interferometrii.

Navržený koncept experimentálních sestav je odvozen od měření využívajícího refraktometr s konstantní délkou (tracking refraktometr) [35, 36, 43] vyhodnocujícího index lomu vzduchu v ose svazku. Použití tohoto přístupu s identickou osou svazku interferometru i refraktometru ve víceosém odměřování není konstrukčně možné.

V experimentech jsem se zaměřila na:

- Vyhodnocení rychlých změn indexu lomu vzduchu v závislosti na změně délky měřicího ramene interferometru.
- Stanovení úrovně nejistoty měření, která je spojena se změnou vzdálenosti dvou měřících rovnoběžných svazků protiběžného interferometru.

Toto studium bylo prováděno s důrazem na potenciální aplikace v souřadnicových měřících systémech, jako je např. mikroskop se skenující sondou (*SPM – Scanning Probe Microscopy*) používaný v metrologii. Použití kombinace interferometru a tracking refraktometru s identickou dráhou laserových svazků, jaké jsem popsala ve své diplomové práci [36], není možné použít v souřadnicových systémech. Proto jsem se pokusila navrhnout řešení s rovnoběžnými a navzájem blízkými svazky a ověřit, jakou roli hraje vzájemná vzdálenost těchto svazků při použití tracking refraktometru pro on-line kompenzaci fluktuací indexu lomu vzduchu.

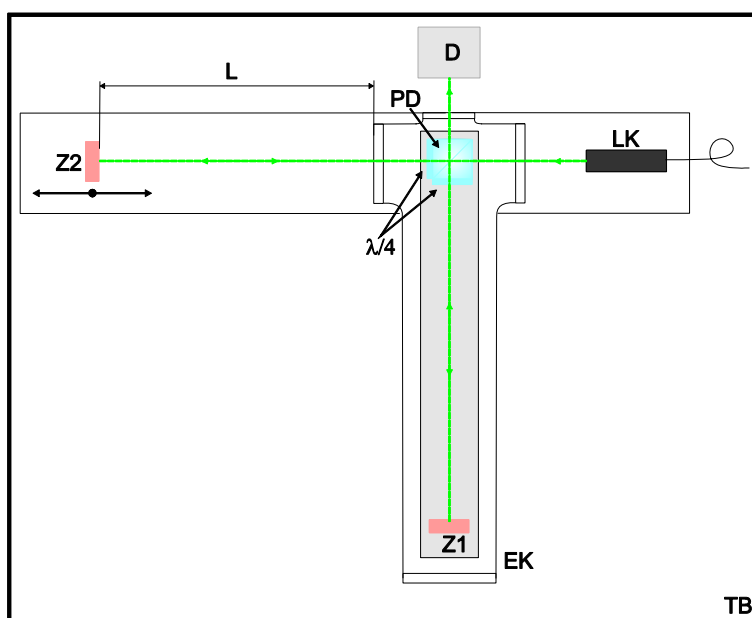
Změnu indexu lomu vzduchu vyhodnocuji přes délkový šum interferometru. Termínem délkový šum označuji fluktuace hodnot délky měřené laserovým interferometrem. Výsledné změny naměřené délky mají původ ve frekvenčním a amplitudovém šumu laseru, šumu elektronického detekčního řetězce zpracovávajícího interferometrický signál, včetně kvantizačního šumu analogově-digitálního převodu (*A/D převod*), teplotní roztažnosti měřicí sestavy a především ve fluktuacích indexu lomu vzduchu v optické dráze měřicího svazku. Všechny tyto zdroje šumu/nejistoty mají svoji specifikou šířku pásma, v níž se projevují [45, 46].

3.2.1 Experimentální sestava kombinující Michelsonův interferometr s refraktometrem

K vyhodnocení rychlých změn indexu lomu vzduchu v závislosti na změně délky měřicího ramene interferometru jsem sestavila experimentální sestavu v podobě

Michelsonova interferometru s odrazy od rovinných zrcadel, který zde hraje roli tracking refraktometru.

Schematicky je experimentální sestava znázorněna na obr. 3.2.1. Optická vlna vycházející z laserového kolimátoru (LK) vstupuje do optické sestavy v evakuované kyvetě (EK). Polarizační dělicí hranol (PD), jehož součástí jsou v referenčním a měřicím rameni čtvrtvlnné destičky ($\lambda/4$), rozdělí původní optickou vlnu na dvě (referenční, měřicí). Vlny prochází příslušnými dráhami a po odrazu od příslušných rovinných zrcadel Z1, Z2 dopadají zpět na PD. Dochází ke sloučení obou vln do jedné (komplexní vlna). Komplexní vlna (vzniká složením dvou vln s polarizací vertikální a horizontální) vstupuje do homodynní detekční jednotky (D), kde je dále zpracována. Pro stabilizaci podmínek měření byla sestava umístěna v termostatizovaném prostředí (termostatizovaném boxu – TB).

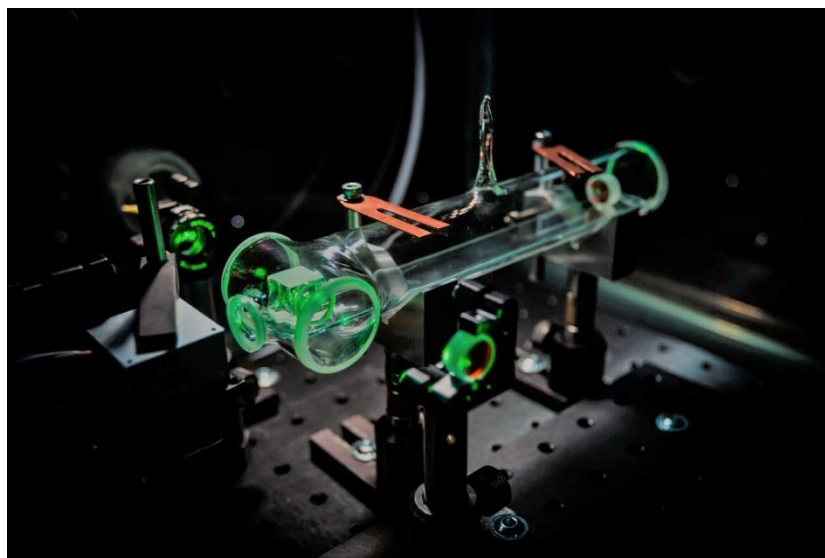


Obr. 3.2.1: Schéma experimentální sestavy pro detekci rychlých změn indexu lomu vzduchu. Optická vlna vycházející z laserového kolimátoru (LK) vstupuje do evakuovaného prostředí uvnitř kyvety (EK) a dělí se pomocí polarizačního dělicího hranolu (PD) na dvě vlny. Průběžná vlna opouští vakuum, odrazí se od rovinného zrcadla Z2 zpět. Délka trasy vně evakuované kyvety je označena L. Odražená vlna se odrazí od zrcadla Z1 uvnitř kyvety. Obě vlny se rekombinují na PD, opouští kyvetu a dopadají na detektor D. Celá sestava je umístěna v termostatizovaném prostředí (TB)

Experimentální sestavu jsem upořádala na hliníkové základové desce s využitím univerzálních držáků. Jako zdroj laserového záření jsem použila jednofrekvenční, nízkošumový, vysoce stabilní Nd:YAG laser o vlnové délce 532 nm (obchodní název Prometheus, firma Coherent). Laserový svazek byl do experimentální sestavy přiveden optickým vláknem typu PM (polarization maintaining – zachovávající polarizaci) na konci

s laserovým kolimátorem. Průměr laserového svazku vstupujícího do optické sestavy byl 3,5 mm. Rozměr polarizačního dělicího hranolu byl 10 mm x 10 mm x 10 mm, průměr zrcadel 12,7 mm a délka měřicího a referenčního ramene v základní poloze 130 mm.

Interferometr pracuje v režimu počítání interferenčních proužků se základním rozlišením $\lambda/2$ (266 nm) a interpolací na 1/1024 interferenčního proužku. K detekci interferenčního signálu jsem použila detektor pracující na principu homodynní detekce [13]. Součástí sestavy byla digitální jednotka pro měření indexu lomu vzduchu [47]. Fotografie části experimentální sestavy je na obr. 3.2.2.



Obr. 3.2.2: Fotografie části experimentální sestavy protiběžného interferometru, kde je jedna z evakuovaných kyvet

Evakuovanou kyvetu s polarizačním dělicím hranolem a referenčním zrcadlem jsem realizovala ve spolupráci s kolegyní Tatianou Šarlejovou a kolegou Stanislavem Šlechtickým, kteří mají mnohaleté zkušenosti s výrobou absorpčních kyvet pro stabilizaci laserů.

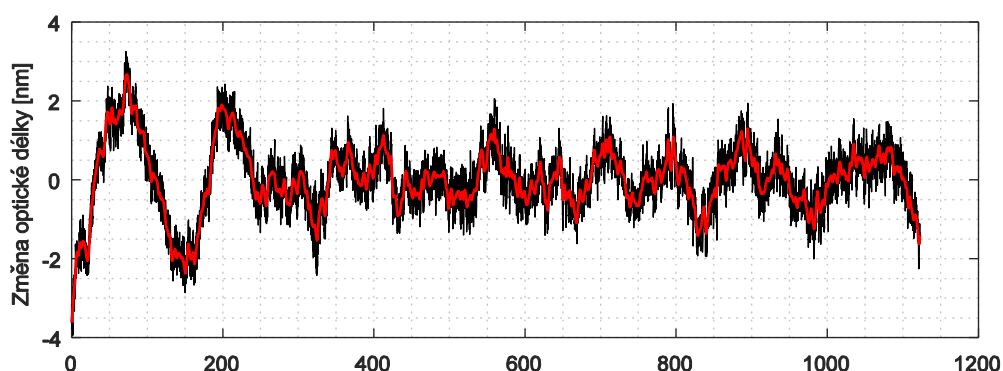
3.2.2 Výsledky měření rychlých změn indexu lomu vzduchu – změna délky měřicího ramene

Experimentální sestava popsaná v odstavci 3.2.1 byla určena pro monitorování změn indexu lomu vzduchu přes vyhodnocování délkového šumu interferometru s referenční dráhou v evakuované kyvetě.

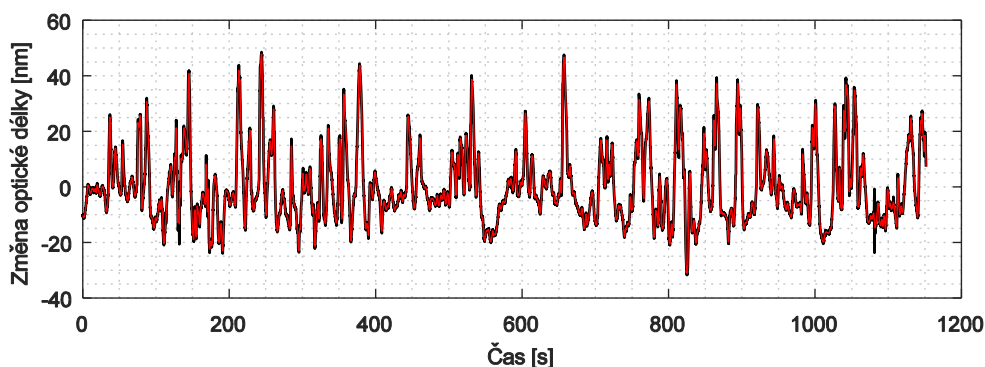
Měření probíhalo následujícím způsobem. Polohu rovinného zrcadla Z_2 (v měřicím rameni Michelsonova interferometru) jsem postupně měnila, od délky L (délka měřicí větve Michelsonova interferometru vně evakuované kyvety) 2 mm do 80 mm s krokem 5 mm. V každé poloze jsem naměřila přibližně 20 minut dlouhý záznam interferenčního signálu se vzorkovací frekvencí 10 ms. Z naměřených dat jsem stanovila efektivní hodnotu

RMS (root mean square – efektivní hodnota) délkového šumu. Záznam na obr. 3.2.3. představuje délkový šum s délkou měřicího ramene 10 mm, na obr. 3.2.4 je záznam délkového šumu s délkou měřicího ramene 80 mm. Šířka frekvenčního pásma je od 5 mHz do 1 Hz.

Naměřený záznam interferenčního signálu obsahujícího i kvantizačního šumu A/D převodu a šumu elektroniky, které se projevují na vyšších kmitočtech, je vyznačen černě. V záznamech je tento vysokofrekvenční šum (VF šum) potlačen frekvenční filtrací a pro výpočet hodnoty RMS fluktuací indexu lomu vzduchu jsou použity filtrované průběhy označené červeně. Jako filtr jsem použila digitální dolní propust typu FIR z knihovny programového systému MATLAB. Parametry filtru jsem nastavila tak, abych neztratila charakter signálu a zároveň potlačila VF šum. Během měření došlo také k odpovídajícímu délkovému driftu způsobenému teplotní dilatací celé sestavy, která byla umístěna na hliníkové desce. Tento lineární drift je v záznamech potlačen pomocí vlnkové transformace (wavelet transform) [48].

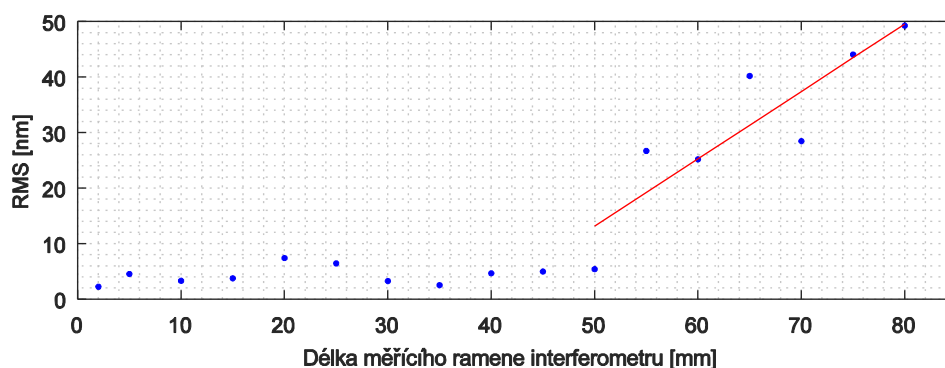


Obr. 3.2.3: Časový záznam délkového šumu s délkou ramene 10 mm. Naměřený záznam interferenčního signálu obsahujícího i kvantizační šum A/D převodu a šum elektroniky (černá), filtrovaný záznam pro výpočet RMS (červená)



Obr. 3.2.4: Časový záznam délkového šumu s délkou ramene 80 mm. Naměřený záznam interferenčního signálu obsahujícího i kvantizační šum A/D převodu a šum elektroniky (černá), filtrovaný záznam pro výpočet RMS (červená)

Výsledky hodnoty RMS délkového šumu s ohledem na délku měřicího ramene jsou na obr. 3.2.5. Závislost není lineární, do délky měřicího ramene cca 50 mm jsou změny indexu lomu vzduchu nízké, pohybují se na úrovni jednotek nanometrů. Pro uvedené délky měřicích tras je lze považovat za zanedbatelné, projevuje se zde šum laseru, elektroniky a mechanické vlivy (vibrace). Nad 50 mm šum začíná růst a roste přibližně úměrně se změnou vzdálenosti. Tento nárůst souvisí s chováním proudění vzduchu, které popisují v kapitole 2, odstavci 2.4.



Obr. 3.2.5: Hodnoty RMS délkového šumu v závislosti na změně délky měřicího ramene. Modré body – výsledná hodnota RMS délkového šumu při dané délce měřicího ramene. Červená křivka – proložení výsledných hodnot RMS délkového šumu lineární závislostí (pro délky měřicího ramene 50 – 80 mm)

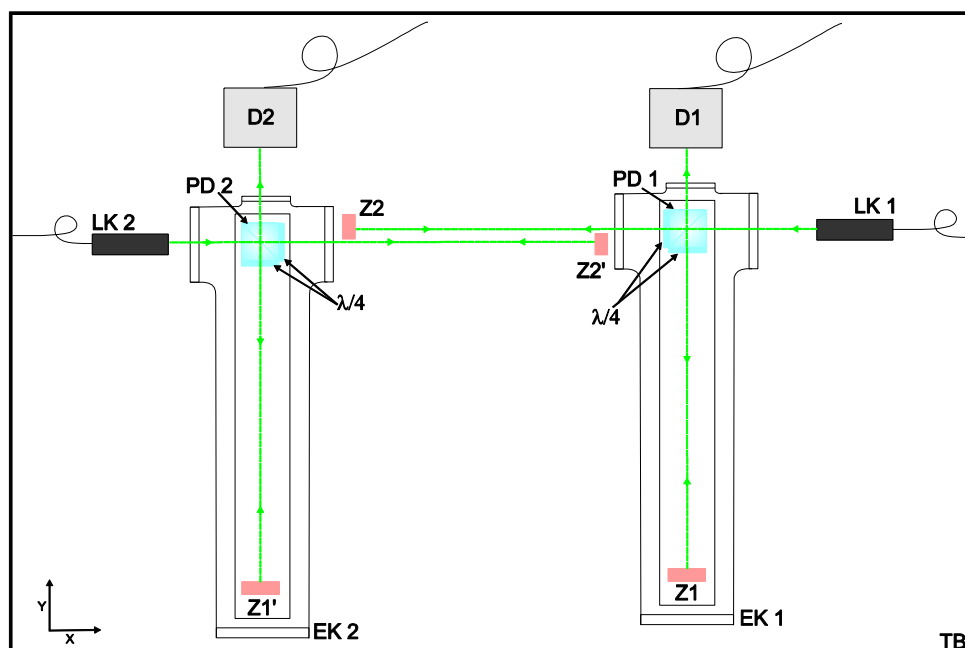
Ze získaných výsledků je možné usuzovat, že rychlé změny indexu lomu vzduchu jsou důsledkem pohybu určitých elementárních objemů vzduchu s konstantním indexem lomu, obdobně, jak byl tento jev ve větším měřítku popsán v [16]. Pracujeme-li s délkami svazků pod hranicí rozměru tohoto elementárního objemu, je vliv fluktuací indexu lomu

zanedbatelný a začíná růst až teprve, je-li tato délka překročena a začíná se projevovat efekt pohybu těchto vzduchových „bublin“. Z tohoto vyplývá, že vliv šumu na měření posunutí a celkovou nejistotu polohovacího a měřicího systému je významný a musí být brán v úvahu při návrhu interferometrických měřicích systémů. Znamená to také, že uvažujeme-li o kombinaci tracking refraktometru a interferometru se svazky, které nejsou identické, ale pouze rovnoběžné a vzájemně blízké, lze očekávat, že blízkost pod touto kritickou hranicí (zde 50 mm) bude znamenat vysokou míru korelace délkového šumu způsobeného fluktuacemi indexu lomu a tím i naději použít tracking refraktometr pro kompenzaci tohoto jevu.

3.2.3 Protiběžný interferometr

Experimentální sestava protiběžného interferometru (schematicky znázorněna na obr. 3.2.6) umožňuje studovat chování proudění vzduchu v ose měřicích svazků. Sestava je určená pro stanovení rychlých změn indexu lomu vzduchu v závislosti na změně vzdálenosti (rozteče) mezi dvěma měřicími svazky protiběžných interferometrů. Výsledky těchto měření mají význam pro návrh měřicích systémů polohy v souřadnicovém odměřování.

Sestava se skládá ze dvou Michelsonových interferometrů s referenčními rameny v evakuované kyvetě. Měřicí ramena interferometru jsou uspořádána tak, že lze měnit jejich vzájemnou vzdálenost (rozteč). Principiálně se jedná o podobné uspořádání jako v předchozím případě (odstavec 3.2.1). Jsou použity stejné optické prvky, způsob detekce, laserový zdroj, referenční a měřicí ramena jsou v základní pozici stejně dlouhá, pouze laserový svazek se pomocí vláknového děliče rozděluje do dvou větví. V základní poloze je rozteč laserových svazků v měřicím rameni protiběžného interferometru 7 mm a délka ramen je 130 mm. Každá ze sestav je zvlášť umístěna na hliníkové desce. Horní hliníková deska je posuvná a sestavy lze vůči sobě posouvat v ose Y a tím měnit vzájemnou rozteč laserových svazků v měřicím rameni. Interferometry mají identické délky měřicí a referenční větve (jsou vyvážené), což eliminuje vliv frekvenčního šumu laseru.



Obr. 3.2.6: Schéma experimentální sestavy pro měření úrovně nejistoty interferometrického měření při vzájemném posunutí měřicích svazků. Optická vlna vycházející z laserových kolimátorů LK1 (resp. LK2), vstupuje do evakuovaného prostředí uvnitř kyvety EK1 (resp. EK2), dělí se pomocí polarizačního dělicího hranolu PD1 (resp. PD2) na dvě vlny. Průběžná vlna opouští vakuum, odrazí se od rovinného zrcadla Z2 (resp. Z2') zpět. Odražená vlna se odrazí od zrcadla Z1 (resp. Z1') uvnitř kyvety. Obě vlny se rekombinují na PD1 (resp. PD2). Opouští kyvetu a dopadají na detektor D1 (resp. D2). Sestavy lze vůči sobě posouvat v ose Y a měnit vzájemnou rozteč laserových svazků v měřicím rameni. Celá sestava je umístěna v termostatizovaném prostředí (TB)

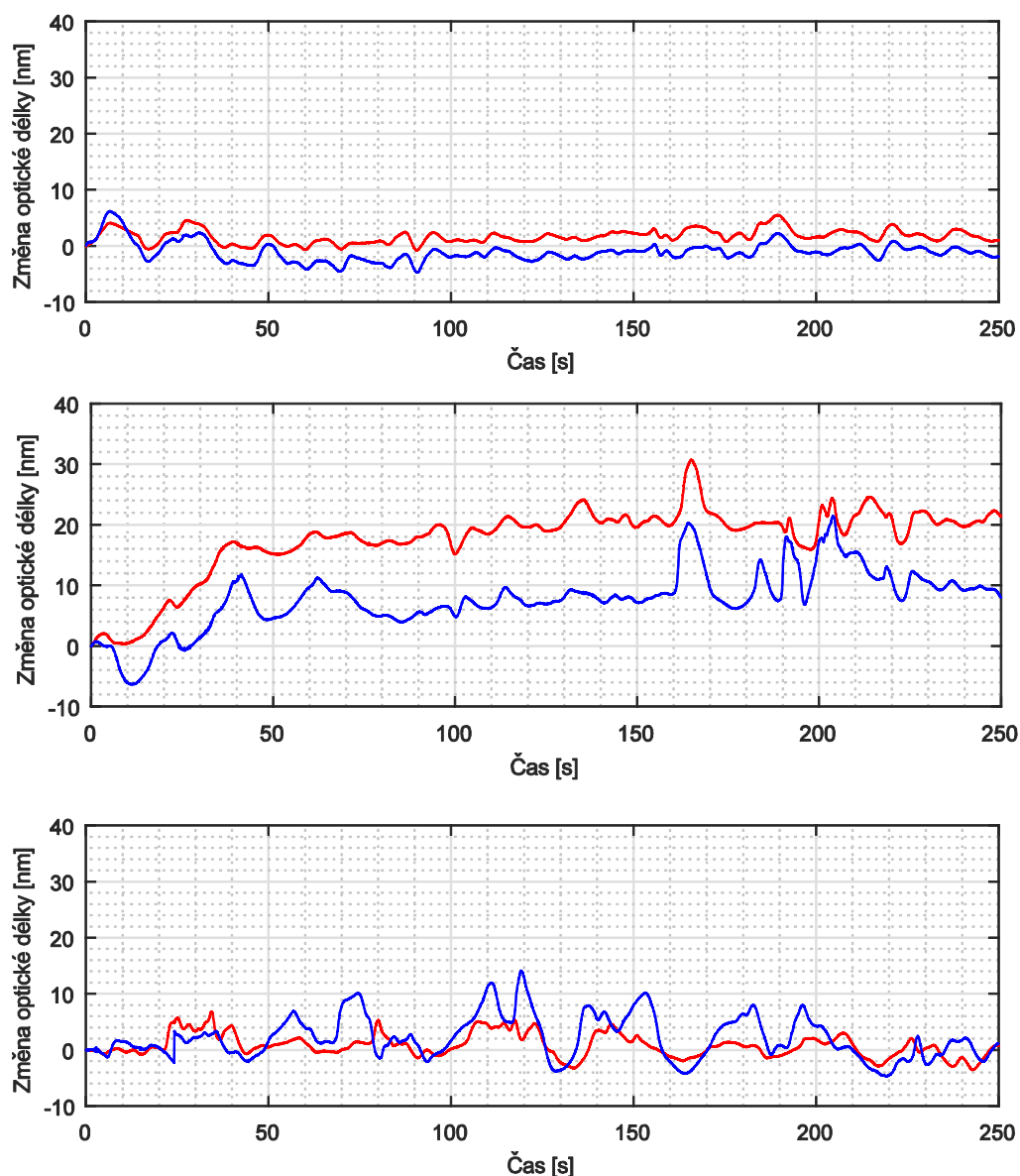
3.2.4 Výsledky měření rychlých změn indexu lomu vzduchu – změna rozteče dvou měřicích svazků

Zde uvádím výsledky změny optické délky protiběžného interferometru v závislosti na změně vzdálenosti mezi měřicími svazky. Při měření jsem použila vzorkovací frekvenci 500 Sa/s, která je mnohem rychlejší, než je šířka pásma délkového šumu způsobujícího změny indexu lomu prostředí.

Záznamy ukazují povahu indukovaného délkového šumu a míru shody mezi změnou vzdáleností dvou měřicích svazků. Na obr. 3.2.7 jsou časové záznamy změny optické délky v závislosti na laterálním posuvu měřicích ramen protiběžného interferometru. Záznamy odpovídají vzdálenosti (rozteči) měřicích svazků – 7 mm, 25 mm a 50 mm.

Během měření došlo k odpovídajícímu délkovému driftu způsobeného teplotní dilatací celé sestavy, která byla umístěna na dvou hliníkových deskách. Roli může hrát také malý teplotní drift vzduchu ovlivňující index lomu prostředí. K potlačení pomalého lineárního driftu jsem použila vlnkovou transformaci. Při vyhodnocení záznamů jsem se zaměřila pouze na rychlé změny pohybující se ve frekvenčním pásmu od 100 mHz do jednotek Hz.

Ve frekvenčním pásmu pod 100 mHz postačuje ke kompenzaci fluktuací indexu lomu vzduchu nepřímá metoda měření – Edlenova rovnice. Tuto metodu nelze použít ve vyšším frekvenčním pásmu v důsledku pomalé odezvy snímačů teploty, tlaku, vlhkosti a obsahu CO₂. Nicméně tuto nepřímou metodu v měření používám, jelikož tracking refraktometr měří jen relativní změny.



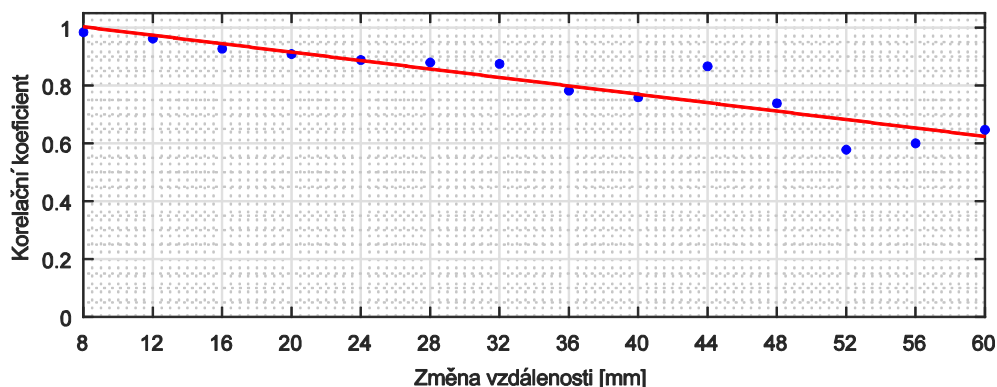
Obr. 3.2.7: Časové záznamy změny optické délky v závislosti na laterálním posunu měřicích svazků protiběžného interferometru. Vzdálenosti mezi měřicími svazky 7 mm (horní), 25 mm (prostřední) a 50 mm (dolní). Interferometr pravý – červená, interferometr levý – modrá

V tabulce 3.2.1 jsou přehledně uvedeny hodnoty korelačního koeficientu a směrodatné odchylky σ pro vzdálenost měřicích svazků odpovídající záznamům na obr. 3.2.7.

Vzdálenost svazků [mm]	Korelační koeficient	σ [nm]
7	0,99	1,27
25	0,87	2,16
50	0,69	3,51

Tab. 3.2.1: Hodnoty korelačního koeficientu a směrodatné odchylky v závislosti na vzdálenosti měřicích svazků

Z naměřených dat jsem vypočítala korelační koeficient, který udává vzájemnou shodu změn optických drah v závislosti na jejich vzdálenosti obr. 3.2.8. Každý záznam jsem měřila po dobu 20 minut a vzdálenost středů laserových svazků jsem měnila s krokem 4 mm. Z výsledků měření je možné pozorovat pokles korelačního koeficientu v závislosti na zvětšující se vzdálenosti měřicích svazků.



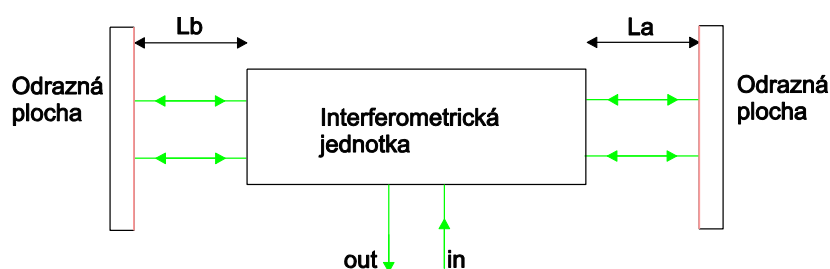
Obr. 3.2.8: Korelační koeficient – shoda měřicích ramen interferometru v závislosti na změně vzájemné vzdálenosti

Ze všech získaných výsledků lze usuzovat, že fluktuace indexu lomu vzduchu se projevují na úrovni pohybu určitých elementárních objemů a mají charakter náhodného procesu. To má zásadní dopad na interferometrické odměřování. Pracujeme-li v délce do 50 mm (měřicího ramene), je tato délka pod rozměrem tohoto elementárního objemu (můžeme ho nazývat vzduchovou bublinou) a fluktuace indexu lomu vzduchu jsou zanedbatelné. Pokud použijeme ke kompenzaci vlivu fluktuací tracking refraktometr s mimoběžným, ale blízkým měřicím svazkem (vzdálenost svazků je nižší než rozměr bubliny), je shoda průběhu fluktuací vysoká (do vzdálenosti 20 mm se korelační koeficient pohybuje nad hodnotou 0,90) a lze údaj z refraktometru úspěšně použít pro kompenzaci fluktuací v reálném čase. Pokud použijeme ke kompenzaci fluktuací indexu lomu vzduchu uspořádání s blízkými rovnoběžnými měřicími svazky, lze dosáhnout snížení celkové nejistoty měření o jeden až dva řády.

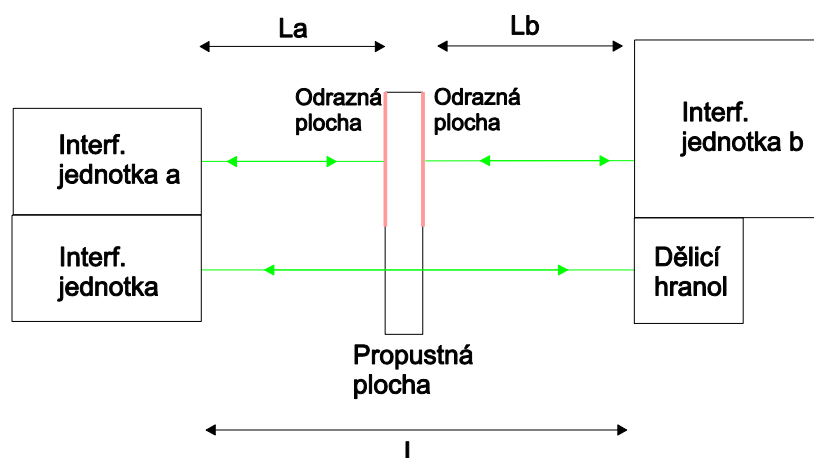
3.3 NÁVRH KONFIGURACÍ INTERFEROMETRŮ PRO KOMPENZACI INDEXU LOMU V SOUŘADNICOVÉM ODMĚŘOVÁNÍ

Na základě hypotézy o charakteru chování vzduchu, jeho vlivu na interferometrická měření a na základě předchozích výsledků měření, které jsem představila v odstavci 3.2, navrhuji novou interferometrickou sestavu. Navržená sestava kombinuje refraktometr s konstantní délkou (tracking refraktometr) a interferometr pro odměřování polohy od rovinného zrcadla. Jedná se o dvě varianty uspořádání. První varianta předpokládá měření z vnitřní strany – interferometrická jednotka umístěna uvnitř měřeného tělesa, obr. 3.3.1. Druhá varianta umožňuje opačné měření – měření z vnější strany, obr. 3.3.2.

Navrhované sestavy představují systém pro měření v jedné ose, ale jsou koncipovány pro měřicí systém rozšiřitelný na víceosé odměřování. Interferometrické sestavy jsou určeny pro experimentální ověření funkce interferometru s kompenzací vlivu fluktuací indexu lomu vzduchu s mimoběžnými, avšak blízkými, rovnoběžnými svazky. Měření se provádí v rámci pevně vymezeného rozsahu délky. Optické uspořádání je navrženo s cílem využití například v souřadnicových systémech mikroskopů, souřadnicových odměřovacích zařízeních strojů apod. Měřeným tělesem je nosič vzorku, nebo polohovatelný souřadnicový stůl.



Obr. 3.3.1: Schematické znázornění interferometru pro měření odrazem od vnitřní strany vzorku



Obr. 3.3.2: Schematické znázornění interferometru pro měření odrazem z vnější strany vzorku

Rozbor odměřování vzdálenosti

Koncept kompenzace indexu lomu vzduchu zde vychází z návrhu [36], který jsem prezentovala ve své diplomové práci a který předpokládal měření v jedné ose. Jedná se o přeurený interferometr s odměřováním vzdálenosti (posuvu) ze dvou směrů a současně s monitorováním celkové optické délky v ose měření. Toto monitorování představuje tracking refraktometr a umožňuje odečíst vliv fluktuací indexu lomu.

V návrhu interferometrického systému pro souřadnicové odměřování není možné zachovat plnou identitu optických drah svazků pro měření posuvu a svazků pro tracking refraktometrii. Používám souběžné blízké svazky, pro které je korelace fluktuací přiměřeně vysoká.

Pro odměřování vzdálenosti (viz obr. 3.3.2) platí:

$$L_a + L_b = L, \quad (3.1)$$

kde L_a (resp. L_b) je vzdálenost vůči referenčnímu bodu, L je celkový měřicí rozsah. Pro odměřování polohy vzorku, nebo souřadnicového stolu nás zajímají vzdálenosti vůči referenčnímu bodu, nebo rámu, tedy vzdálenost L_a (nebo L_b). Interferometr měří inkrementálně, takže za předpokladu tuhosti vztažného rámu a konstantní vzdálenosti L platí:

$$\Delta L_a = -\Delta L_b. \quad (3.2)$$

Máme-li k dispozici oba údaje, lze posuv vyjádřit jako:

$$posuv = \frac{\Delta L_a - \Delta L_b}{2}. \quad (3.3)$$

Interferometrické měření délek L_a a L_b je zatíženo fluktuacemi optické délky způsobené fluktuacemi indexu lomu. Tyto fluktuace se projevují s vysokou mírou korelace také v monitorované konstantní délce L . Jejich potlačení (v míře odpovídající korelaci tohoto efektu v blízkých svazcích) v měřené veličině lze dosáhnout takto:

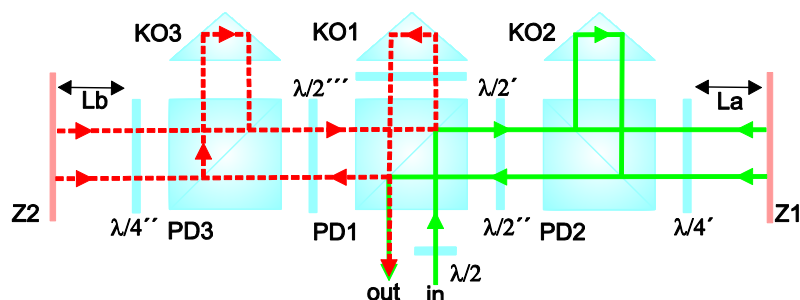
$$posuv = \frac{\Delta L_a - \Delta L_b}{2} - \Delta L. \quad (3.4)$$

Sestava na obr. 3.3.2 představuje uspořádání s nezávislým měřením všech tří veličin – L , L_a i L_b . Sestava na obr. 3.3.1 pak návrh řešení, které vyhovuje přímo rozdílu $L_a - L_b$, resp. $\Delta L_a = -\Delta L_b$. V případě odměřování v rámci souřadnicového interferometrického odměřovacího systému by mohla být doplněna souběžným tracking refraktometrem.

3.3.1 Návrh optického uspořádání interferometru pro měření z vnitřní strany vzorku

Optická sestava interferometru pro měření z vnitřní strany vzorku je schematicky znázorněna a popsána na obr. 3.3.3. Sestava se skládá z polarizačních dělicích hranolů, koutových hranolů, půlvlnných a čtvrtvlnných destiček. Jedná se o čtyřprůchodové uspořádání. Průchod optickou sestavou interferometru je následující:

Optická vlna vstupuje (*in*) přes půlvlnnou destičku ($\lambda/2$) do polarizačního dělicího hranolu (*PD1*). Na dělicí rovině *PD1* dochází k rozdělení optické vlny na dvě části. Část vlny se kolmo odrazí a část přímo prochází. Odražená optická vlna prochází dráhu, které je na obr. 3.3.3 znázorněna zeleně. Optická vlna procházející *PD1* přímo prochází červeně vyznačenou dráhu (obr. 3.3.3). Na výstupu (*out*) z optické sestavy interferometru dochází k rekombinaci optických vln. Měřená změna optické dráhy je mezi vzdálenostmi, které jsou v obr. 3.3.3 označeny *La* a *Lb*.



Obr. 3.3.3: Schéma sestavy interferometru určené pro měření z vnitřní strany. Optická vlna vstupuje (*IN*) přes půlvlnnou destičku ($\lambda/2$) do polarizačního dělicího hranolu (*PD1*). Na dělicí rovině *PD1* dochází k rozdělení optické vlny na dvě části. Část vlny se odráží a část přímo prochází. Odražená vlna prochází půlvlnnou destičkou ($\lambda/2''$), polarizačním dělicím hranolem (*PD2*) a čtvrtvlnnou destičkou ($\lambda/4'$), dopadá na rovinné zrcadlo (*Z1*). Po odraze od *Z1* a průchodu $\lambda/4'$ se vlna na dělicí rovině *PD2* odráží a prochází koutovým hranolem (*KO2*). Dopadá zpět na dělicí rovinu *PD2*, odráží se, prochází $\lambda/4'$ a dopadá na *Z1*. Po odraze od *Z1* prochází vlna $\lambda/4'$, *PD2*, $\lambda/2''$ a na dělicí rovině *PD1* se odráží a vystupuje z optické sestavy. Vlna procházející přímo *PD1* dále prochází půlvlnnou destičkou ($\lambda/2'$), koutovým hranolem (*KO1*) a na dělicí rovině *PD1* se odráží a prochází půlvlnnou destičkou ($\lambda/2'''$), polarizačním dělicím hranolem (*PD3*), čtvrtvlnnou destičkou ($\lambda/4''$) a dopadá na rovinné zrcadlo (*Z2*). Po odraze se na dělicí rovině *PD3* odráží do koutového hranolu (*KO3*). Po průchodu *KO3* se na dělicí rovině *PD3* odráží a dopadá na *Z2*. Odražená vlna prochází $\lambda/4''$, *PD3*, $\lambda/2'''$ na dělicí rovině *PD1* se odráží, prochází $\lambda/2'$, *KO1*, *PD1* a vystupuje z optické soustavy. Na výstupu dochází k interferenci mezi sjednocenými optickými vlnami (*OUT*)

Návrh optické konfigurace předpokládá v případě použití pro souřadnicové odměřování umístění optiky interferometrů uvnitř polohovacího stolu souřadnicového systému. Celkový rozsah polohování je pak vymezen vnějšími pevnými zrcadly, mezi nimiž se

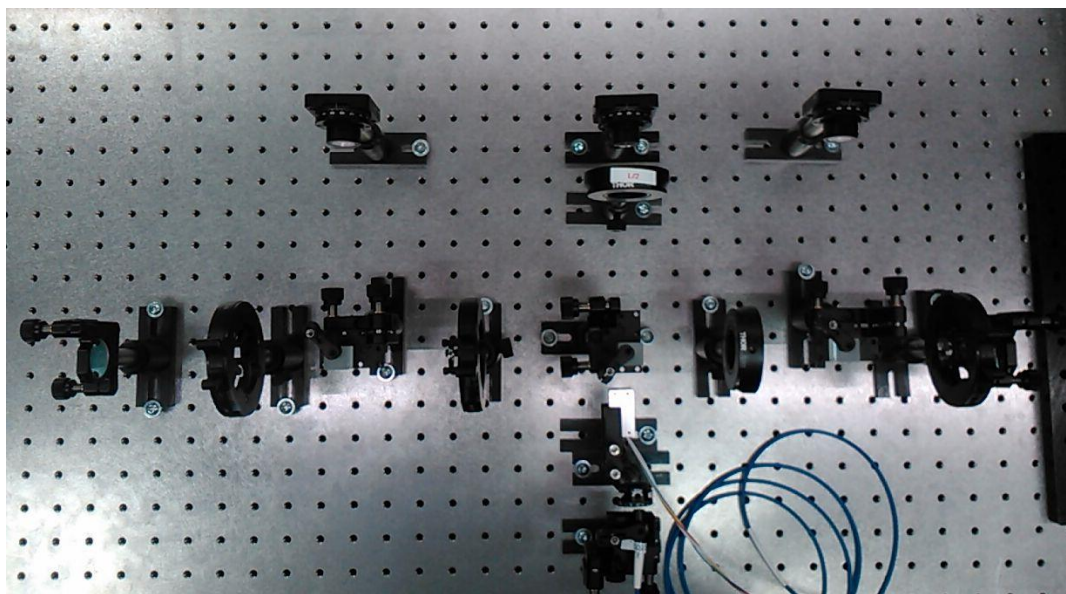
sestava pohybuje. Mechanická konstrukce vnějšího rámu s těmito zrcadly (zvláště její teplotní roztažnost) pak určuje celkovou stabilitu systému a schopnost kompenzovat pomalé změny indexu lomu.

Interferometr měří diferenčně rozdíl vzdálenosti od polohovacího stolu k referenčnímu zrcadlu (Z1) od vzdálenosti téhož ke druhému referenčnímu zrcadlo (Z2). Vzhledem k inkrementální povaze interferometrického měření se jedná o změnu těchto vzdáleností:

$$L_{out} = \Delta L_a - \Delta L_b. \quad (3.5)$$

3.3.2 Ověření funkce optické sestavy interferometru pro měření z vnitřní strany vzorku

Interferometr pro měření odrazem od vnitřní strany vzorku (v experimentální sestavě dochází k odrazu od rovinných zrcadel) jsem v prvním kroku uspořádala s volnou optikou na optickém stole v laboratorních podmínkách, abych si ověřila správnost funkce navrhovaného optického uspořádání. Jednotlivé optické prvky byly umístěny v univerzálních držácích. Optická sestava interferometru je zobrazena na obr. 3.3.4.



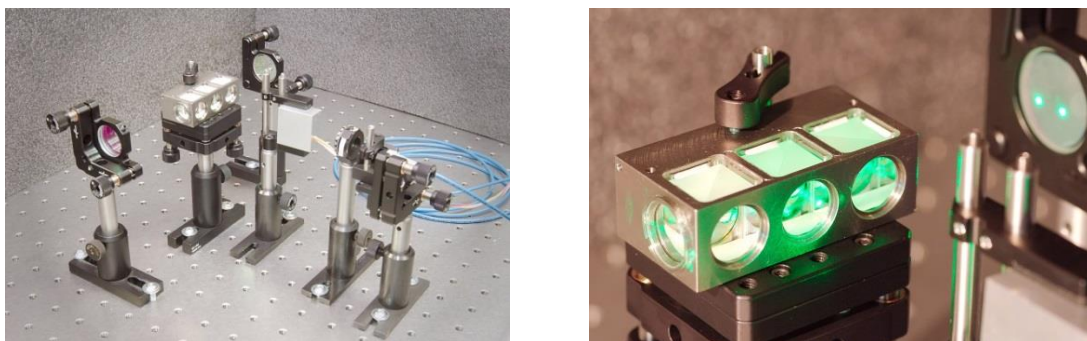
Obr. 3.3.4: Fotografie optické sestavy interferometru pro odměřování z vnitřní strany. Optické komponenty uchyceny ve standardně používaných držácích. Optická sestava sloužící k ověření správné funkce jednotlivých optických prvků a systému jako celku

Konfigurace odpovídá předešlému schématu z obr. 3.3.3. Polarizační dělicí hranoly mají rozměry 15 mm x 15 mm x 15 mm, jsou vyrobeny z optického skla SF 14, koutový hranol má průměr 15 mm je vyroben z optického skla BK 7, čtvrtvlnné a půlvlnné destičky z krystalického křemene jsou o průměru 15 mm. Tenké AR vrstvy na jednotlivých optických prvcích jsou optimalizované na vlnovou délku 532 nm. Veškeré tenké vrstvy

byly realizovány na ÚPT panem Mgr. Jindřichem Oulehlou na vakuové napařovací aparatuře SYRUSPro 710 od fy. Leybolt Optics (nyní již Bühler). Jedná se o technologii napařování elektronovým svazkem za podpory iontů (plasma ion assisted deposition PIAD). Veškeré vrstvy, které jsou dále zmíněny v této práci, byly realizovány na této napařovací aparatuře.

Pro tuto optickou konfiguraci interferometru jsem navrhla titanovou klec, do které jsem jednotlivé optické prvky vlepila. Takovýto interferometr mohu využít v laboratorních podmínkách k další experimentům, které se týkají interferometrického odměřování. Kompletní sestava interferometru je vyfocena na obr. 3.3.5.

Samotné vlepění optických komponent do titanové klece je poměrně náročná činnost. Je zapotřebí nejen přesně kolimovaného laserového svazku, speciální mechanické pomůcky, ale i jistou dávku zkušeností s lepením a nastavováním jednotlivých komponent, které jsem díky působení na ÚPT získala v rámci řešení jiných projektů.



Obr 3.3.5: Fotografie sestavy interferometru pro odměřování z vnitřní strany vzorku (vlevo), detailní fotografie s jednotlivými optickými prvky vlepěnými v titanové kleci (vpravo)

3.3.3 Návrh optické sestavy interferometru pro měření z vnější strany vzorku

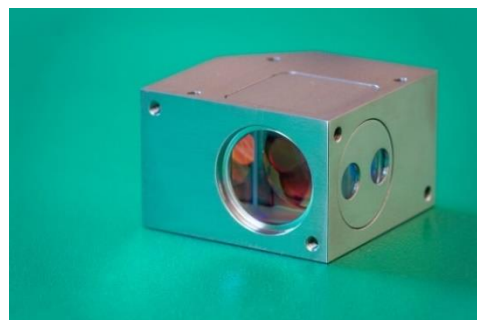
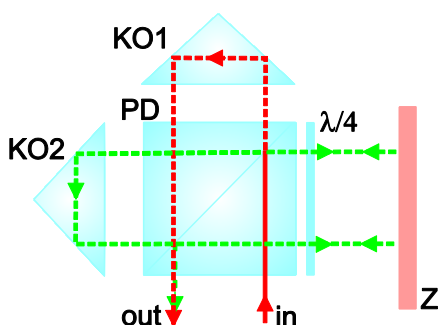
Optická sestava interferometru se skládá ze tří čtyřprůchodových interferometrických jednotek (IU , IUa , IUb), speciálního dělicího hranolu (SH) a měřeného vzorku (MV). Princip čtyřprůchodové interferometrické jednotky a speciálního dělicího hranolu je popsán níže. Měřeným vzorkem je v prvním návrhu rovinné planparalelní okno, které má v horní polovině z obou stran nanesenou odraznou vrstvu.

Čtyřprůchodová interferometrická jednotka

Čtyřprůchodová interferometrická jednotka se skládá z polarizačního dělicího hranolu, dvou koutových hranolů a $\lambda/4$ destičky. Schematicky je znázorněna na obr. 3.3.6 spolu s fotografií, kde jsou jednotlivé optické prvky vlepěny v titanovém pouzdře.

Optická vlna vstupující (in) do polarizačního dělicího hranolu (PD) se na jeho dělicí rovině rozdělí na dvě části (referenční, měřicí). Referenční optická vlna prochází červeně

vyznačenou dráhu. Měřicí optická vlna se na dělicí rovině *PD* odrazí kolmo a prochází zeleně vyznačenou dráhu. Na výstupu (*out*) dochází k sjednocení rozdělené optické vlny. Optické prvky jsou stejných rozměrů a ze stejného materiálu jako v předchozí sestavě v odstavci 3.3.2.



Obr. 3.3.6: Schéma průchodu optické vlny čtyřprůchodovou interferometrickou jednotkou (vlevo).

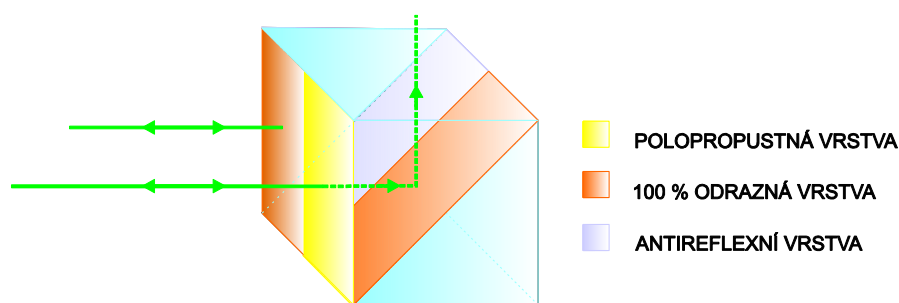
Fotografie interferometru – jednotlivé optické prvky vlepeny v titanové kleci (vpravo).

Vlna vstupující do polarizačního dělicího hranolu (*PD*) se na dělicí rovině rozdělí na dvě části (referenční – červená, měřicí – zelená). Referenční vlna prochází přímo *PD*, koutovým hranolem (*KO1*) a přes *PD* vystupuje ven z optické sestavy stranově posunuta. Měřicí vlna kolmo odražená na dělicí rovině *PD* prochází $\lambda/4$ destičkou, dopadá na rovinné zrcadlo *Z* a odrazí se zpět, prochází drahou přes koutový hranol (*KO2*) a dopadá zpět na *Z* stranově posunuta. Po odrazu od *Z* a průchodu přes $\lambda/4$ destičku se měřicí vlna na dělicí rovině *PD* kolmo odrazí a vystupuje z optické sestavy. Na výstupu (*out*) dochází k rekombinaci rozdělené optické vlny

Speciální dělicí hranol

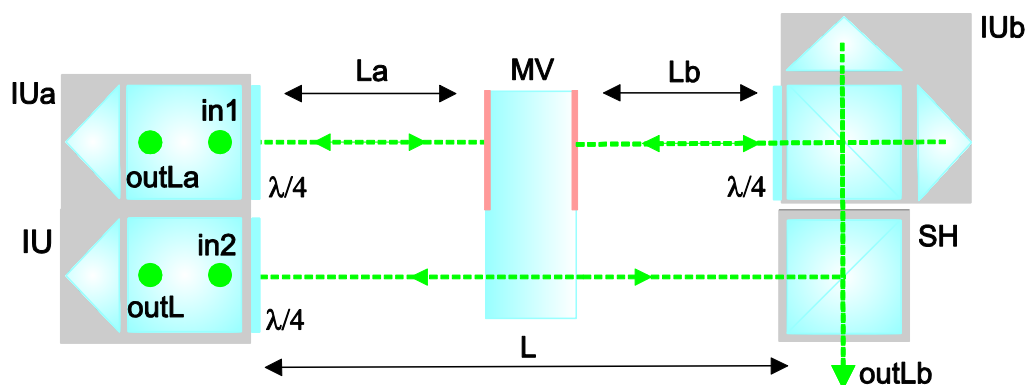
Tento dělicí hranol byl navrstven a stmelen výhradně pro tuto experimentální sestavu. Slouží k rozdělení optické vlny (popsáno níže). Schematicky je hranol naznačen na obr. 3.3.7. Rozměry hranolu jsou 15 mm x 15 mm x 15 mm. Hranol je rozdělen a navrstven následovně:

Přední a přeponová plocha je rozdělena na poloviny. Na jedné polovině přední plochy je nanесena odrazná vrstva optimalizovaná na kolmý dopad s ideální odrazivostí 100 % (reálná odrazivost 98 %), na druhé polovině je polopropustná vrstva. Na jedné polovině přeponové plochy je nanесena odrazná vrstva optimalizovaná na dopad pod 45° s ideální odrazivostí 100 % (reálná odrazivost 98 %), na druhé polovině je *AR* vrstva optimalizovaná na 532 nm a 633 nm. Na horní i spodní ploše hranolu je také nanесena *AR* vrstva. Hranol je vlepen v titanové kleci.



Obr. 3.3.7: Schéma speciálně navrstveného dělicího hranolu s naznačeným průchodem laserového svazku. Přední plocha hranolu je rozdělena na poloviny. Na jedné polovině je nanesena polopropustná vrstva (vyznačena žlutě) a na druhé polovině odrazná vrstva s ideální odrazivostí 100 % (reálná odrazivost 98 %, vyznačena oranžově). Přeponová plocha hranolu je rozdělena opět na polovinu. Na jedné polovině je nanesena odrazná plocha s ideální odrazivostí 100 % (reálná odrazivost 98 %) a na druhé polovině je AR vrstva (vyznačena fialově). Průchod laserového svazku je naznačen zeleně

Schéma výsledného optického uspořádání interferometru je znázorněno na obr. 3.3.8. Sestava disponuje dvěma vstupy ($in1$, $in2$) a třemi výstupy ($outL$, $outLa$, $outLb$). Interferometrická jednotka IU měří celkovou dráhu L a interferometrická jednotka IUa (resp. IUb) dráhu La (resp. Lb).

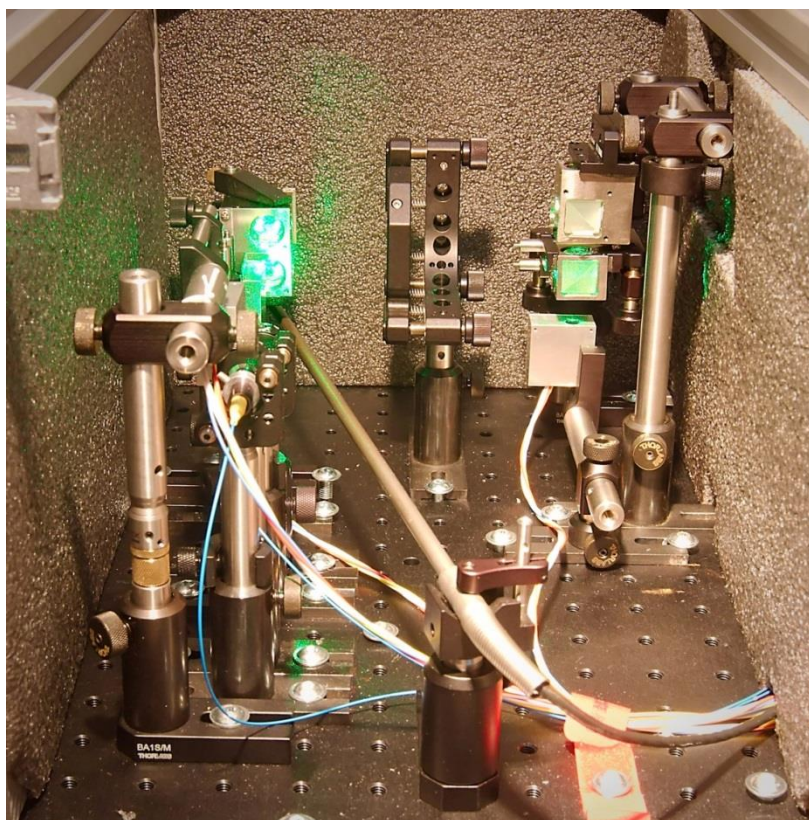


Obr. 3.3.8: Schéma sestavy interferometru určené pro měření z vnější strany. Interferometrické jednotky jsou čtyřprůchodové (optická vlna se od odrazné plochy odrazí dvakrát). Optická sestava má dva vstupy ($in1$, $in2$) a tři výstupy ($outL$, $outLa$, $outLb$). Optická vlna vstupuje ($in1$) a prochází interferometrickou jednotkou IUa dle schématu na obr. 3.3.6 a měří vzdálenost La (výstup $outLa$). Optická vlna vstupující ($in2$) do interferometrické jednotky IU prochází stejným způsobem jako v případě IUa , místo na rovinné zrcadlo, však dopadá na polopropustnou vrstvu speciálního hranolu (SH), kde se optická vlna částečně odrazí zpět a částečně dopadá na dělicí rovinu SH . Odražená optická vlna prochází IU a opět dopadá na druhou polovinu SH , kde je navrstvena odrazná vrstva s odrazivostí 98%. Po odraze od této plochy se optická vlna vrací a vystupuje z IU (výstup $outL$). Optická vlna propuštěná na polopropustné vrstvě SH dopadá na dělicí rovinu SH

a kolmo se odrazí a vstupuje do IUb. Po průchodu příslušnými drahami (referenční, měřicí) v IUb optická vlna vystupuje z optické sestavy (výstup outLb)

3.3.4 Uspořádání experimentální sestavy interferometru pro měření z vnější strany vzorku

Jedná se o experimentální sestavu ověřující funkci interferometru s kompenzací indexu lomu vzduchu. Měření probíhalo v laboratorních podmínkách. Optická sestava byla umístěna na optickém stole a uzavřena v boxu stabilizující podmínky měření. Součástí sestavy byla digitální jednotka pro měření indexu lomu vzduchu. Fotografie sestavy je na obr. 3.3.9.



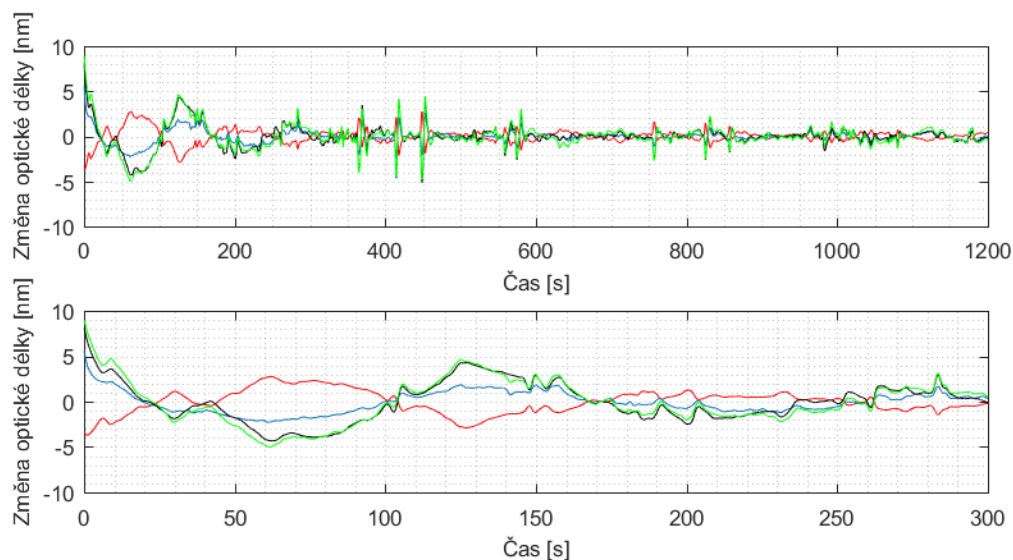
Obr. 3.3.9: Foto experimentální sestavy interferometru pro odměřování z vnější strany vzorku

Optická sestava interferometru byla napájena nízkošumovým jednofrekvenčním Nd:YAG laserem o vlnové délce 532 nm určeným primárně pro metrologické aplikace (obchodní název Prometheus, firma Coherent). Laserový svazek byl veden optickými vlákny typu PM (polarization maintaining – zachovávající polarizaci) a pomocí vláknového děliče 1:2 jsem optický výkon laseru rozdělila přibližně v poměru 50:50 do dvou větví. Průměr laserového svazku vstupujícího do optické sestavy interferometru byl 3,5 mm. Rozteč středů laserových svazků byla 8 mm v horizontální ose.

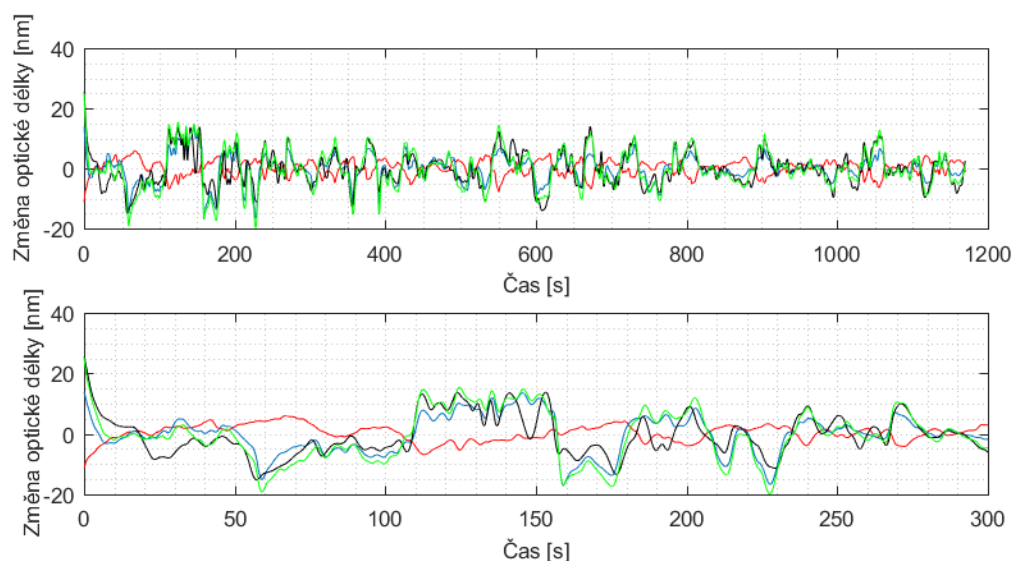
Experimentální sestava je koncipovaná tak, že laserové svazky z interferometrů jdou nad sebou ve vzdálenosti 20 mm. Celková dráha ve vzduchu je 115 mm. V polovině dráhy ve vzduchu je umístěno planparalelní skleněné okno, které je rozděleno na poloviny. V horní polovině je z obou stran nanесena vysoce odrazná vrstva na kolmý dopad s odrazivostí 98 %, ve spodní polovině je nanесena AR vrstva. Veškeré tenké vrstvy jsou optimalizované pro vlnové délky 532 nm a 633 nm. K detekci interferenčního signálu jsem použila detekční jednotky využívající principu homodynní detekce [11].

3.3.5 Výsledky měření

Jak již bylo zmíněno výše, měření probíhalo v laboratorních podmínkách, sestava byla umístěna na optickém stole. Každé měření probíhalo přibližně po dobu 20 min. Na obr. 3.3.10 záznam měření, při kterém byla optická sestava uzavřena v boxu z termoizolačního materiálu z důvodu stabilizace měření resp. fluktuací indexu lomu vzduchu. Horní záznam představuje celkový časový záznam měření. Spodní záznam znázorňuje prvních 5 minut měření. Časový záznam na obr. 3.3.11 odpovídá měření v otevřeném prostoru laboratoře. Horní záznam opět představuje celkový časový záznam měření a spodní záznam prvních 5 minut měření. Změna optické délky měřené dráhy L_a je znázorněna modře, L_b červeně a L černě (viz obr. 3.3.8). Zelený záznam představuje součet $L_a + L_b$.



Obr. 3.3.10: Časový záznam změny optické délky interferometru umístěného v uzavřeném boxu. Celkový záznam měření – horní, prvních 5 minut měření – spodní záznam. Délka L : černý záznam, L_a : modrý záznam, L_b : červený záznam, $L_a + L_b$: zelený záznam



Obr. 3.3.11: Časový záznam změny optické délky interferometru umístěného volně na optickém stole. Celkový záznam měření – horní, prvních 5 minut měření – spodní záznam. Délka L : černý záznam, L_a : modrý záznam, L_b : červený záznam, $L_a + L_b$: zelený záznam

Na záznamech z měření v uzavřeném boxu jsou patrné korelace mezi jednotlivými signály. Změny způsobené fluktuací indexu lomu vzduchu se pohybují v jednotkách nanometrů. Na druhých dvou záznamech odpovídajících měření v otevřeném prostoru je patrná menší vzájemné korelace mezi signály, což je způsobeno prouděním vzduchu resp. fluktuacemi indexu lomu vzduchu a vzájemnou vzdáleností mezi laserovými svazky (20 mm ve vertikálním směru). V tomto směru se více projevuje gradient teploty, který ovlivňuje změnu indexu lomu vzduchu. Záznamy jsou také zatíženy šumem elektroniky a částečně mechanickou nestabilitou celé sestavy. V tabulce 3.3.1 jsou shrnuty výsledky měření pro měření v uzavřeném a otevřeném prostoru. Korelační koeficient mezi měřenou celkovou vzdáleností L a vzdáleností danou součtem $L_a + L_b$ je při měření v uzavřeném prostoru větší než v případě měření v otevřeném prostoru. Z výsledků vyplývá, že ve frekvenčním pásmu od 100 mHz do 20 Hz dochází při použití kompenzační metody ke snížení nejistoty měření způsobené vlivem fluktuací indexu lomu vzduchu, při měření v uzavřeném prostoru.

	Uzavřený box	Otevřený box
Korelační koeficient ($L, L_a + L_b$)	0,96	0,88
$\sigma(L)$ [nm]	1,24	5,48
$\sigma(L_a + L_b)$ [nm]	1,36	6,11
$\sigma(L_a - L_b)$ [nm]	0,37	3,38
$\sigma(L_a)$ [nm]	0,67	4,32
$\sigma(L_b)$ [nm]	0,73	2,38

Tab. 3.3.1: Porovnání výsledků měření v uzavřeném a otevřeném boxu

Navrhované experimentální sestavy byly realizovány pro ověření navrhovaného principu kompenzace vlivu fluktuací indexu lomu vzduchu. Nejedná se o metrologický systém, který by vyžadoval použití materiálů s vysokou stabilitou a malou teplotní roztažností a odpovídající mechanický návrh. Teplotní drift je ale přítomen i u velmi pečlivě navržených metrologických měřicích zařízení. Navíc, tato metoda kompenzace nenahrazuje absolutní měření hodnoty indexu lomu, ale klade si za cíl adresovat pouze určité frekvenční pásmo fluktuací, jak bylo uvedeno v kapitole 3.2.4. Mechanická stabilita naší experimentální sestavy pro demonstraci jevu v tomto pásmu postačuje.

KAPITOLA 4

4 APLIKOVANÝ VÝZKUM V RÁMCI PROJEKTU S PRŮMYSLOVÝM PARTNEREM

V této kapitole zmiňuji projekty, na kterých oddělení Koherenční optiky ÚPT spolupracovalo (resp. spolupracuje) s průmyslovými partnery, a na kterých jsem se významnou měrou podílela (resp. podílím). Uvedené projekty se týkají odměřování pomocí laserového interferometru v různých konfiguracích a s různými laserovými zdroji. Účast oddělení Koherenční optiky v těchto projektech využívá znalostí, zkušeností a technologií, které jsou výsledkem předcházejícího výzkumu.

4.1 OPTICKÝ KALIBRAČNÍ DÉLKOVÝ SNÍMAČ

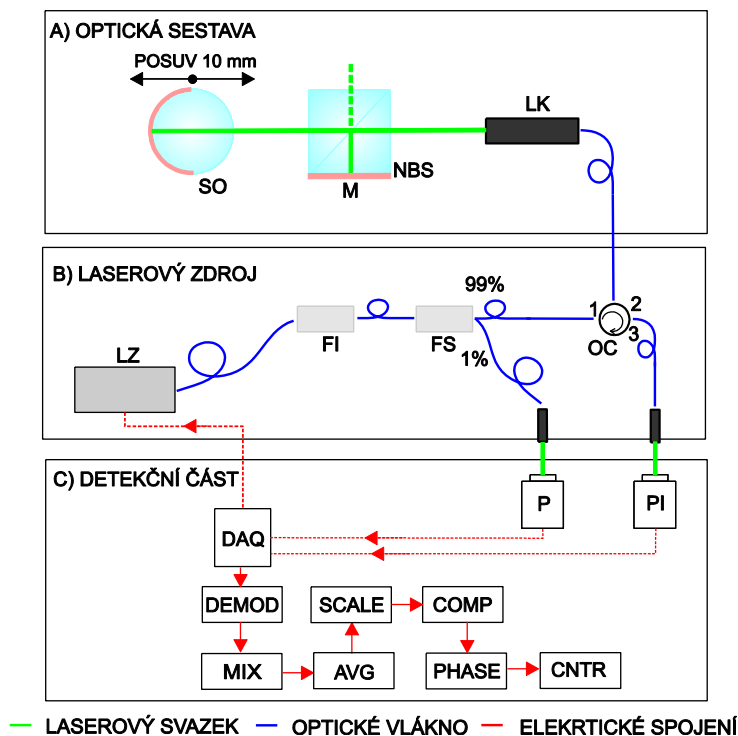
Na projektu „Bezkontaktní optické měřicí metody a systémy pro přesné strojírenství“ spolupracovalo oddělení Koherenční optiky ÚPT s Ústavem radioelektroniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně (UREL) a průmyslovým partnerem firmou Mesing, spol. s r.o. (Mesing) [49].

Jedná se o projekt zaměřený na výzkum bezkontaktních optických metod využívajících principu interference koherentního světla orientovaný na měření vzdáleností, polohy a geometrických veličin. Jedním z cílů projektu bylo nahrazení doposud používaných elektronických snímačů optickými měřicími systémy. Používané snímače zatěžující měřený objekt přtlakem se využívají ve strojírenském průmyslu při měření polohy v automatických testovacích stanicích a slouží k měření tolerancí výrobků.

Jednalo se o velmi multioborový záměr výzkumu, kde hlavním úkolem ÚPT bylo studium optických bezkontaktních metod pro přesná měření délek, spolupráce na vývoji prototypu kalibračního vláknového interferometru, jehož součástí byl i vývoj detekční techniky [15]. Opakovatelnost měření optického kalibračního snímače byla požadovaná v rozsahu 1–10 nm, měřicí rozsah v jednotkách milimetrů. Cílem bylo zachování jednoduchého, kompaktního designu a zároveň snadného způsobu nastavení optické části snímače. V tomto projektu jsem se zabývala kompletní realizací optické části snímače na základě předběžného návrhu a podílela jsem se na jeho postupném vývoji.

4.1.1 Princip optického kalibračního délkového snímače

Optický kalibrační snímač pracuje na principu interference laserového záření. Lze ho rozdělit na tři části, jak je schematicky znázorněno na obr. 4.1.1 – měřicí senzor (optická část), laserový zdroj a detekční systém.



Obr. 4.1.1: Principiální schéma optického kalibračního snímače: a) optická sestava interferometru, b) laserový zdroj, c) detekční část. Optický signál z laserového zdroje (LZ) je veden optickým vláknem. Prochází Faradayovým izolátorem (FI – zabráňuje zpětným odrazům do laseru) a vláknovým děličem (FS – dělicí poměr 1:2). Přibližně 1% optického výkonu dopadá na fotodetektor (P) monitorující intenzitu modulovaného laserového výstupu. 99% optického výkonu z LZ prochází přes optický cirkulátor (OC) a laserovým kolimátorem (LK) vstupuje do optické sestavy snímače. Optická vlna dopadá na dělicí rovinu nepolarizačního dělicího hranolu (NBS), rozdělí se na referenční a měřicí. Odražená referenční optická vlna (ROV) se odrazí od odrazné plochy (M – nanese na stěně NBS) zpět. Měřicí optická vlna (MOV) prochází přímo a odrazí se zpět od sférického odražeče (SO – zadní strana odrazná vrstva, přední strana AR vrstva). MOV a ROV se rekombinují na NBS, vstupují do LK a přes OC do fotodetektoru interferenčního signálu (PI). Interferenční signál je dále zpracován modulační detekční technikou DIANA (Digital Interferometry ANALysis) [8]

Základem snímače je Michelsonův laserový interferometr využívající nepolarizační optické prvky. Optická vlna vystupující z vláknového kolimátoru (LK) se na dělicí rovině nepolarizačního dělicího hranolu (NBS) rozdělí na referenční a měřicí. Odražená referenční optická vlna (ROV) dopadá na dielektrickou odraznou plochu (M) a odrazí se zpět.

Dielektrická odrazná plocha je nanесena na stěně *NBS* (v referenčním rameni) a plní funkci odrazného rovinného zrcadla. Měřicí optická vlna (*MOV*) prochází přímo a odrazí se od zadní strany sférického odražeče (*SO*) zpět. *MOV* a *RVO* se sloučí na *NBS* a vstupují do *LK*. Výsledná optická vlna prochází *LK*, optickým cirkulátorem (*OC*) do fotodetektoru interferenčního signálu (*PI*). Interferenční signál je dále zpracován v detekční části.

Detekce interferenčního signálu se provádí pomocí vyhodnocovacího systému, který využívá fotodetektor na homodynní bázi. Jedná se o modulační detekční techniku *DIANA* (Digital Interferometry ANALysis), která byla vyvinuta kolegou Mgr. Šimonem Řeřuchou, Ph.D. Princip metody detailně popisuje ve své disertační práci [8].

Detekční technika vychází z tradiční homodynní detekce. Jádrem metody je využití frekvenčně modulovaného laserového zdroje pro extrakci fázové informace s obdobnou přesností jako u homodynní detekce. Na rozdíl od tradiční homodynní detekce není potřeba v interferometru použití polarizační optiky a k vyhodnocení stačí pouze jeden fotodetektor. Interferenční signál je na výstupu z fotodetektoru digitalizován do diskrétní podoby. Sada algoritmů poté postupně provádí demodulaci původního modulačního signálu a detekci jeho odezvy po průchodu laserovým interferometrem a poté další lineární a goniometrické transformace. Výstupem je dvojice signálů v kvadratuře, která umožňuje odečíst interferenční fázi a převést tuto hodnotu na vzdálenost [15].

4.1.2 Specifikace použitých optických prvků a laserového zdroje

Při návrhu se vycházelo z podoby stávajícího (komerčního) indukčnostního snímače, který připomíná propisovací tužku. K této představě byly uzpůsobeny jednotlivé optické prvky a laserový kolimátor.

Kulová čočka (sférický odražeč) je průměru 6 mm, z optického skla S-LAH 79 (index lomu 2,0033) od firmy Ohara. Díky vysokému indexu lomu kulová čočka funguje jako „cat – eye“ reflektor.

Nepolarizační dělicí hranol (*NBS*) má rozměry 5 mm x 5 mm x 5 mm, je vyroben z materiálu N-BK 7 (indexu lomu 1,5168) a dělí v poměru 50:50.

Laserový kolimátor (*LK*) je tvořen jednomodovým vláknem s FC/APC konektorem na jednom konci a gradientní čočkou (GRIN – Gradient Index) s aperturou 1,8 mm v ocelovém pouzdře na druhém konci. Průměr laserového svazku je 0,5 mm, divergence 0,25°, pracovní vzdálenost je 15 ± 5 mm. GRIN čočka se vyznačuje radiálním gradientem indexu lomu [50]. Všechny tyto komponenty jsou komerčně dostupné. Kulová čočka byla doplněna o odraznou vrstvu (zadní strana kulové čočky) a AR vrstvu (přední strana kulové čočky). Plocha *NBS* byla v referenčním rameni doplněna o odraznou vrstvu. Veškeré vrstvy jsou optimalizované na vlnovou délku použitého laserového zdroje – 1530 nm.

V laboratorních podmínkách jako zdroj laserového záření používám kompaktní laserový modul (RIO Orion™ Laser Module) s modulačním vstupem a s integrovaným systémem pro stabilizaci teploty a proudu od fy. Redfern Integrated Optics (RIO). Vlnová délka je 1530,245 nm, výstupní výkon 10 mW a šířka spektrální čáry < 2 kHz. Rychlost

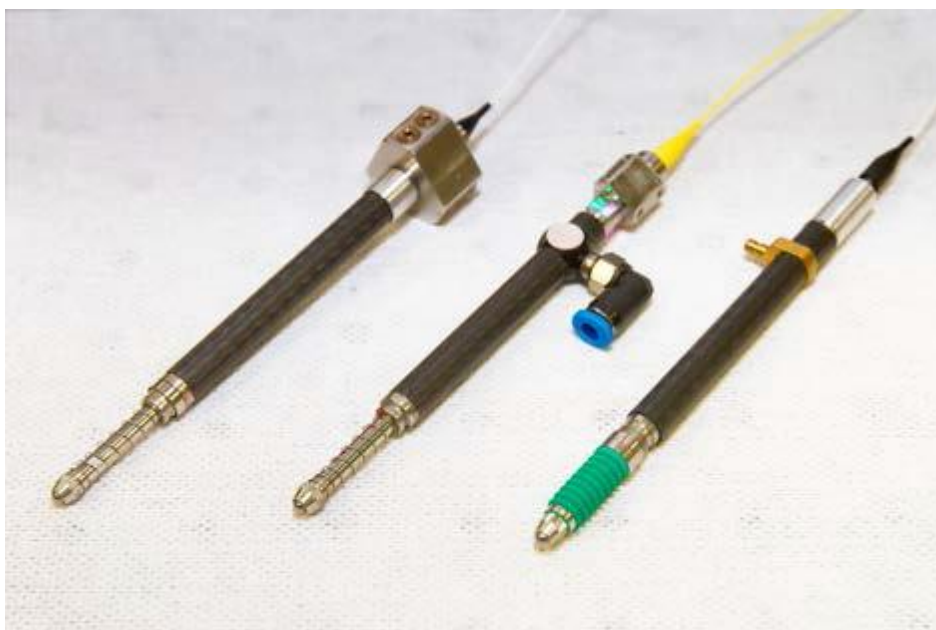
modulace může být až 100 kHz a maximální dosažitelný modulační zdvih 150 MHz. Jedná se o delší vlnovou délku než má He-Ne laser, který se tradičně používá v metrologii délky. Základní rozlišení je proporcionálně nižší, ale na druhou stranu vlákna a optické komponenty pro telekomunikační vlnovou oblast jsou hojně rozšířené a tedy finančně dostupné, což je pozitivní aspekt pro eventuální uplatnění snímače v praxi.

4.1.3 Postupný vývoj optického kalibračního délkového snímače

První prototypy optického kalibračního snímače jsou na obr. 4.1.2. První verze snímačů byly realizovány za účelem experimentálního ověření principu a otestování detekční techniky. Tělo senzoru je vyrobeno z karbonových vláken vyztužených polymerem tak, aby vykazovalo velmi nízký koeficient teplotní roztažnosti. To zabezpečuje stabilitu a pevnost pro zbytek mechaniky. Hrot snímače je komerčně dostupný, byl upraven pro potřeby upevnění sférického odražeče a plní funkci měřicího ramene laserového interferometru. Další součástí těla snímače je hliníkové pouzdro, ve kterém je umístěn *NBS* a vláknový kolimátor.

První verze snímače byla navržena jako tužka bez jakýchkoliv pomocných prvků, které by usnadňovaly nastavení laserového interferometru. Nastavení optického snímače nebylo triviální jednak z pohledu nepřítomnosti pomocných, stavitelných prvků a také s ohledem na použitou vlnovou délku laserového zdroje. Snímač se nakonec podařilo realizovat s velmi dobrým výkonem a minimální ztrátou kontrastu při posuvu měřicího ramene čočky.

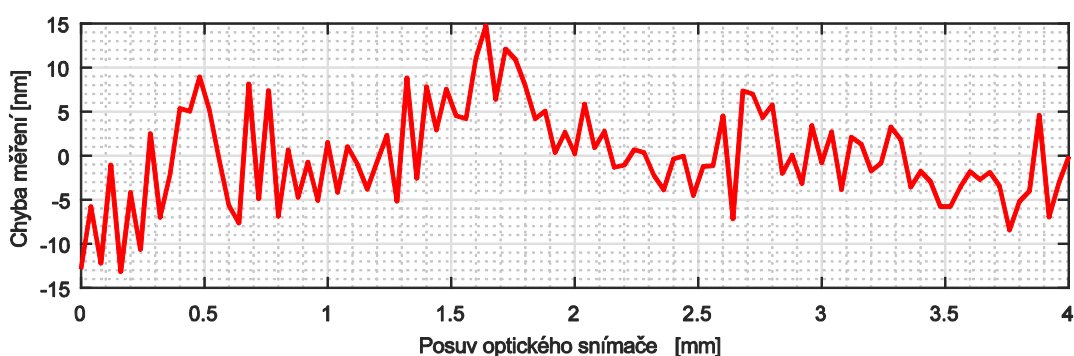
Následující verze byly doplněny o prvky umožňující nastavování laserového kolimátoru v šesti stupních volnosti, na úkor elegantnosti snímače. Nyní je k dispozici již čtvrtá verze snímače, která umožňuje i nastavování *NBS* v šesti stupních volnosti. V této verzi již došlo k odklonu od původní myšlenky tužkového snímače. Otevřeným problémem zůstává, jak elegantně skloubit prvky umožňující usnadnění nastavování laserového interferometru s tužkovým vzhledem snímače, aby při eventuální komerční výrobě byl snímač relativně lehce sestavitelný.



Obr. 4.1.2: Fotografie znázorňující postupný vývoj optického kalibračního snímače

4.1.4 Experimentální ověření funkce a detekční techniky

Funkce optického kalibračního snímače byla ověřena pomocí laserového komparátoru délky. Jedná se o zařízení sloužící ke kalibraci senzorů posunutí, umožňující rozlišení v jednotkách nanometrů, které bylo vyvinuto na ÚPT ve spolupráci s firmou Mesing a Českým metrologickým institutem [51]. Z měření vyplývá, že přesnost měření snímače (standardní kvadratická odchylka) je $\sigma = 5,5 \text{ nm}$ při posuvu měřicí sondy (optického snímače) po dráze 4 mm, viz obr. 4.1.3. Optický kalibrační snímač vyhovuje požadavkům, které jsou na něj kladeny.



Obr. 4.1.3: Záznam měření přesnosti kalibračního optického snímače. Standardní kvadratická odchylka: $\sigma = 5,5 \text{ nm}$ při posunutí měřicí sondy o 4 mm. Měřeno v nanokomparátoru [52]

Výhodou těchto optických snímačů s použitím detekční techniky využívající modulaci laserového zdroje je použití nepolarizačních optických prvků a optických vláken. Díky tomu je systém stabilnější a není citlivý na změnu polarizace vlivem vnějších vibrací. Jediné spojení mezi snímačem a zbytkem systému je přes optické vlákno, díky tomu je snímač imunní vůči elektromagnetickému rušení. Jistou nevýhodou se může zdát nutnost modulace laserového zdroje [52]. Nyní probíhají měření ověřující funkci již čtvrté generace snímače. Otázkou zůstává, jak skloubit jednoduchý design s relativně komplikovaným nastavováním interferometru.

4.2 VÝVOJ PŘESNÝCH INTERFEROMETRICKÝCH SYSTÉMŮ PRO DIMENZIONÁLNÍ METROLOGII A NANOMETROLOGII

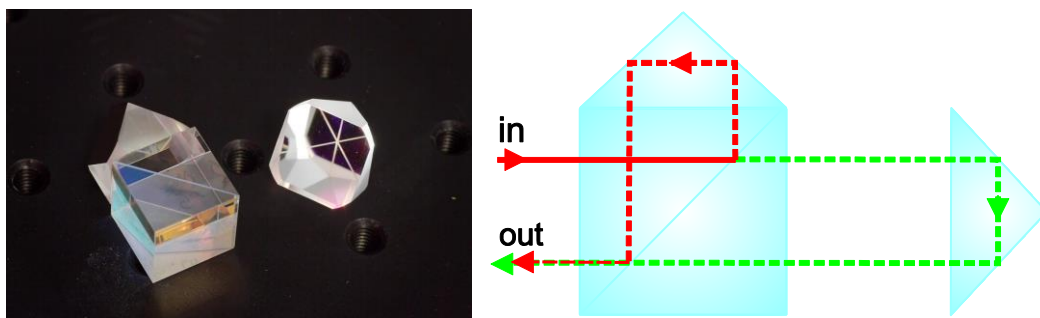
V projektu „Pokročilé interferometrické systémy pro měření v nanotechnologiích“ spolupracovalo oddělení Koherenční optiky ÚPT s firmou Meopta – optika, s.r.o. Přerov (Meopta – optika) na vývoji vysoce přesných interferometrických systémů pro dimenzionální metrologii a nanometrologii [53].

Hlavním cílem projektu byl návrh komplexního interferometrického měřicího systému ve formě prototypu, který bude sloužit jako vzor pro budoucí výrobu a následné komerční využití. Zvolená koncepce systému představovala modulární rodinu komponent konfigurovatelnou pro různá uspořádání, zvláště pro víceosá měření v nanotechnologiích a měřeních topografie povrchů. V rámci tohoto projektu byl vyvinut kompaktní pevnolátkový laser frekvenčně stabilizovaný na referenci v podobě absorpčního přechodu v molekulárním jodu a v souvislosti s tím byla také zdokonalena stávající technologie přípravy absorpčních kyvet pro stabilizaci laserů. Základem kvality celé interferometrické sestavy a také jejím určujícím prvkem byla realizace špičkové optiky.

V rámci tohoto projektu jsem se zabývala veškerým optickým návrhem jednotlivých sestav interferometrů, návrhem kompaktní mechaniky a celkovým zprovozněním interferometrického systému jak v laboratorních podmínkách, tak i v reálném měření. Celý měřicí systém, popř. samotné interferometrické jednotky, našly uplatnění například v národním etalonu pro nanometrologii, umístěném v Českém metrologickém institutu v Brně, v CERN (Švýcarsko) jako senzor vibrací, v Ústavu fyziky materiálu AVČR v.v.i. (ÚFM) pro měření vysokocyklové únavy materiálů, v nanokomparátoru pro kalibraci indukčnostních snímačů polohy a také přímo v provozech spoluřešitele firmě Meopta – optika v systému pro měření zkreslení obrazů optických soustav.

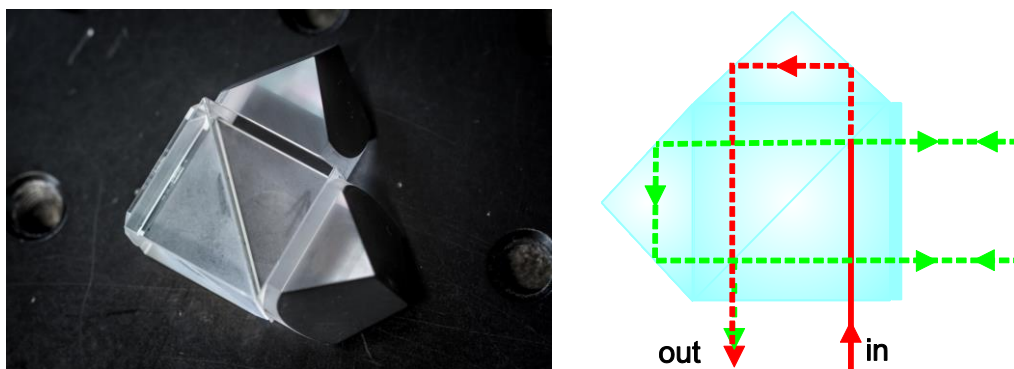
4.2.1 Základní optické konfigurace interferometrů

V rámci projektu vznikly tři základní optické konfigurace interferometrů. Rozměry jednotlivých optických komponent jsem uzpůsobila k průměru a rozteči laserového svazku. V prvním případě jde o konfiguraci pro měření v jedné ose, jejíž fotografie a schéma je na obr. 4.2.1. Jedná se o nejjednodušší realizované uspořádání, skládající se z polarizačního dělicí hranolu s nasáтым koutovým hranolem v referenční trase a samostatným koutovým hranolem určeným k umístění do měřicí trasy. Polarizační dělicí hranol má rozměry 15 mm x 15 mm x 15 mm a koutový hranol má rozměry 15 mm x 15 mm x 14 mm. Tvar koutového hranolu jsem upravila pro potřeby nasátí na polarizační dělicí hranol. Interferometr je určen pro vlnovou délku 532 nm.



Obr. 4.2.1: Optická konfigurace interferometru pro měření v jedné ose. Fotografie optický prvků – vlevo, principiální schéma optické sestavy – vpravo. Referenční trasa – červená, měřicí trasa – zelená

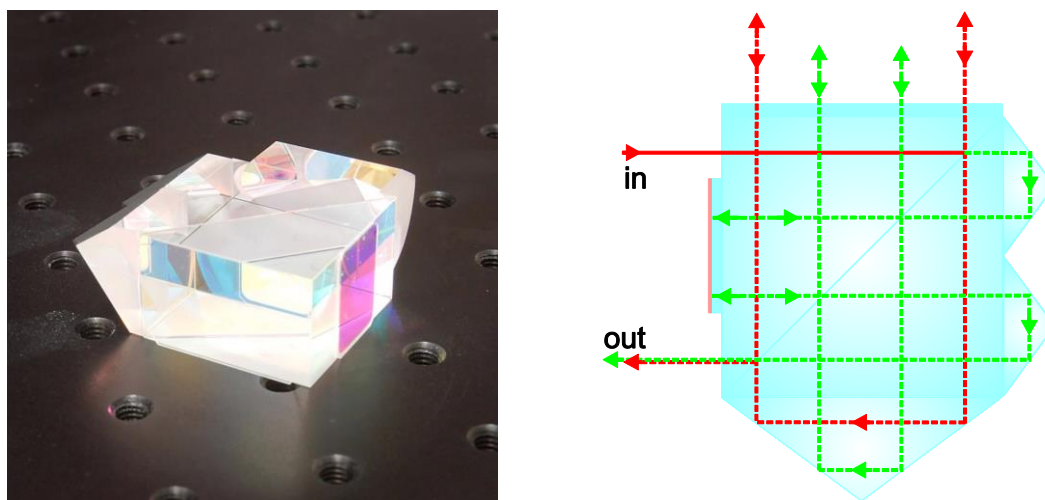
Druhá optická sestava interferometru je určena pro víceosé souřadnicové odměřování s odrazem od rovinného zrcadla. Fotografie a schéma této konfigurace je na obr. 4.2.2. U této konfigurace je koutový hranol jak v referenční, tak i měřicí trase a tím je zajištěna kompenzace malých úhlových chyb koncového zrcadla. Součástí je také fázová retardační destička (čtvrtvlnná destička – $\lambda/4$ destička) nasátá na polarizačním dělicím hranolu v měřicí trase. Rozměry polarizačního dělicího hranolu jsou 15 mm x 15 mm x 10 mm. Rozměry koutových hranolů jsem navrhla pro potřeby nasátí na polarizační dělicí hranol, v tomto případě jsou rozměry 15 mm x 10 mm x 12 mm. Rozměry $\lambda/4$ destičky byly navrženy pro nasátí na polarizační dělicí hranol a dodány firmou CASIX (firma vyrábějící optické prvky). Tato optická konfigurace je vyrobena pro vlnovou délku 633 nm a 532 nm, rozdíl je v polarizační vrstvě na dělicí rovině hranolu a ve fázové retardační destičce.



Obr. 4.2.2: Optická konfigurace interferometru určená pro měření odrazem od rovinného zrcadla. Fotografie optické sestavy – vlevo, principiální schéma optické sestavy – vpravo. Referenční trasa – červená, měřicí trasa – zelená

Poslední optickou soustavou je diferenční interferometr pro odměřování s odrazem od rovinných zrcadel, který je zobrazen na obr. 4.2.3. Diferenční interferometr je určen pro měření v systémech, kde je užitečné eliminovat vlivy dilatací mechaniky měřicí sestavy. Tato optická konfigurace je jak z technologického, tak i optického hlediska nejsložitější.

Na polarizačním dělicím hranolu jsou na všech čtyřech opticky účinných plochách nasády další optické prvky – koutové hranoly nebo $\lambda/4$ destičky. V této konfiguraci jsou rozměry polarizačního dělicího hranolu 32 mm x 32 mm x 20 mm. Velký koutový hranol má rozměry 32 mm x 24 mm x 20 mm. Malý koutový hranol má rozměry 15,9 mm x 20 mm x 19 mm, není osově symetrický a rozlišuje se pravý a levý koutový hranol. $\lambda/4$ destičky byly dodány firmou CASIX. Jedná se o dva rozměrové typy destiček. Velká destička má rozměry 32 mm x 20 mm a malá destička má rozměry 14,5 mm x 20 mm. Na této menší destičce je z vnější strany nanesena odrazná vrstva. Diferenční interferometr byl opět realizován ve dvou variantách jak pro vlnovou délku 633 nm, tak i 532 nm. Rozdíl v těchto dvou variantách je stejný jako u předešlé konfigurace.



Obr. 4.2.3: Optická konfigurace diferenčního interferometru pro měření odrazem od rovinných zrcadel. Fotografie optické sestavy – vlevo, principiální schéma optické sestavy – vpravo. Referenční trasa – červená, měřicí trasa – zelená

Vývoj a realizace všech tří optických sestav interferometrů probíhal ve spolupráci s fy. Meopta. Jako materiál bylo zvoleno křemenné sklo z důvodu vyšší dosažitelné optické kvality (homogenita a možnosti opracování povrchu, velmi nízký koeficient teplotní roztažnosti a tím vyšší hodnoty absolutní dosažitelné přesnosti měření). Z technologického hlediska pak tento materiál navíc umožňuje spojování prvků na optický kontakt (tzv. „sesávání“) a to i s prvky polarizační optiky, bez nichž se interferometrická optika neobejde. Při tomto postupu odpadá nutnost použití optických tmelů a je možno vytvořit soustavy kompaktních rozměrů. Zpoždovací desky, které zde byly použity, jsou z krystalického křemene, který má teplotní roztažnost prakticky identickou s křemenným sklem [54].

Z hlediska výroby je křemenné sklo náročné jak na opracování, tak i na návrh a depozici optických vrstev. Především polarizační vrstvy polarizačních děličů je obtížné navrhnout a optimalizovat pro malý index lomu křemenného skla. Proto se tradičně používá speciální sklo s vysokým indexem lomu SF 14, které však v našem případě

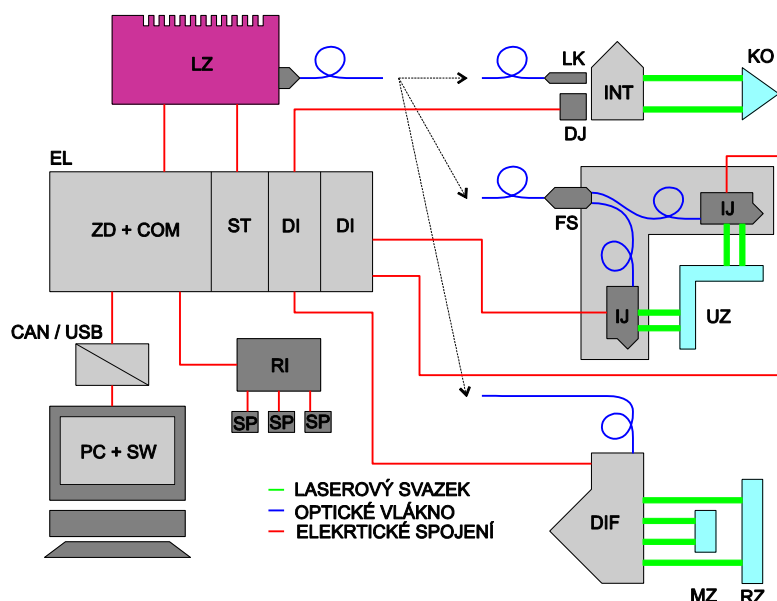
z důvodu vysokého koeficientu teplotní roztažnosti a nemožnosti spojování na optický kontakt polarizační optiky nebylo možné použít.

4.2.2 Modulární interferometrický odměřovací systém

Všechny tři optické konfigurace interferometrů mohou být zakomponovány do modulárního interferometrického systému dle požadovaných potřeb, jak je znázorněno na obr. 4.2.4. Celková sestava interferometrického systému zahrnuje interferometrickou jednotku (optická část), laserový zdroj záření, jednotku pro vyhodnocení indexu lomu vzduchu a elektroniku spolu se softwarem pro zpracování signálu.

Tento interferometrický systém nabízí dílčí nová řešení ve srovnání s komerčními interferometrickými systémy pro měření délek. Jedná se o:

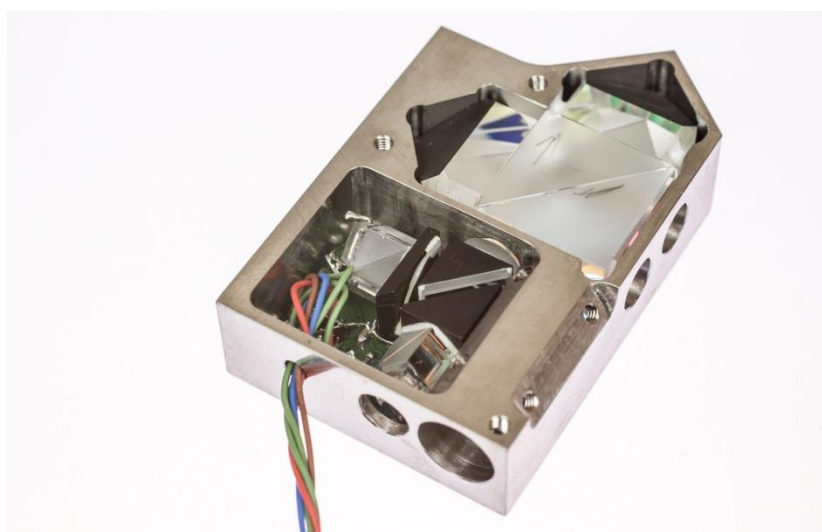
- Použití nízkošumového pevnolátkového laserového zdroje s velkým optickým výkonem (50 mW), postačujícím pro napájení měřicích sestav až v šesti stupních volnosti.
- Stabilizaci optické frekvence laserového zdroje na externí kyvetu plněnou na saturační teplotu [55].
- Optiku vyrobenou z křemenného skla a spojovanou na optický kontakt.



Obr. 4.2.4: Přehledové schéma modulární interferometrické sestavy. LZ – laserový zdroj, EL – skříň s elektronikou, ZD – napájecí zdroj, COM – komunikace (CAN sběrnice), ST – karta stabilizace laseru, DI – karta digitalizace a zpracování interferenčního signálu, RI – jednotka vyhodnocení indexu lomu, SP – snímače parametrů atmosféry, PC + SW – počítač a software pro vyhodnocení dat, INT – jednotka interferometru pro měření v jedné ose, KO – koutový hranol, DJ – homodynní detekční jednotka, LK – laserový kolimátor, FS – vláknový dělič svazku, IJ –

interferometrická jednotka pro měření odrazem od rovinného zrcadla, UZ – úhlové zrcadlo, DIF – diferenční interferometrická jednotka, MZ – měřicí zrcadlo, RZ – referenční zrcadlo

Všechny optické konfigurace interferometrů jsou umístěny v pouzdrech, které umožňují jejich instalaci do příslušné měřicí sestavy. V případě interferometrické jednotky pro měření odrazem od rovinného zrcadla a diferenční interferometrické jednotky jsem navrhla kompaktní pouzdra, která počítají s upevněním laserového kolimátoru (optovláknový přívod z laserového zdroje) a integrací detekční jednotky. Na obr. 4.2.5 je fotografie jednotky interferometru pro měření odrazem od rovinného zrcadla, kde je optická část, detekční jednotka a otvor pro umístění laserového kolimátoru.



Obr. 4.2.5: Fotografie kompaktní interferometrické jednotky pro měření odrazem od rovinného zrcadla. Kompaktní jednotka obsahuje: optickou část, detekční jednotku a prostor pro laserový kolimátor

4.2.3 Realizace interferometrického systému pro souřadnicové odměřování

Realizovala jsem jednu z možných variant modulárního interferometrického systému s interferometrickou jednotkou určenou pro souřadnicové odměřování s odrazem od rovinného zrcadla. Jako laserový zdroj jsem použila kompaktní laser s nelineárním krystalem pro zdvojnásobení frekvence umístěný uvnitř rezonátoru laseru od fy. Oxxius S.A. Jednotlivé optické komponenty rezonátoru laseru jsou zde spojeny na optický kontakt do jednoho bloku. Tím je dosaženo velké robustnosti a spolehlivosti konstrukce, vhodné i do průmyslových podmínek.

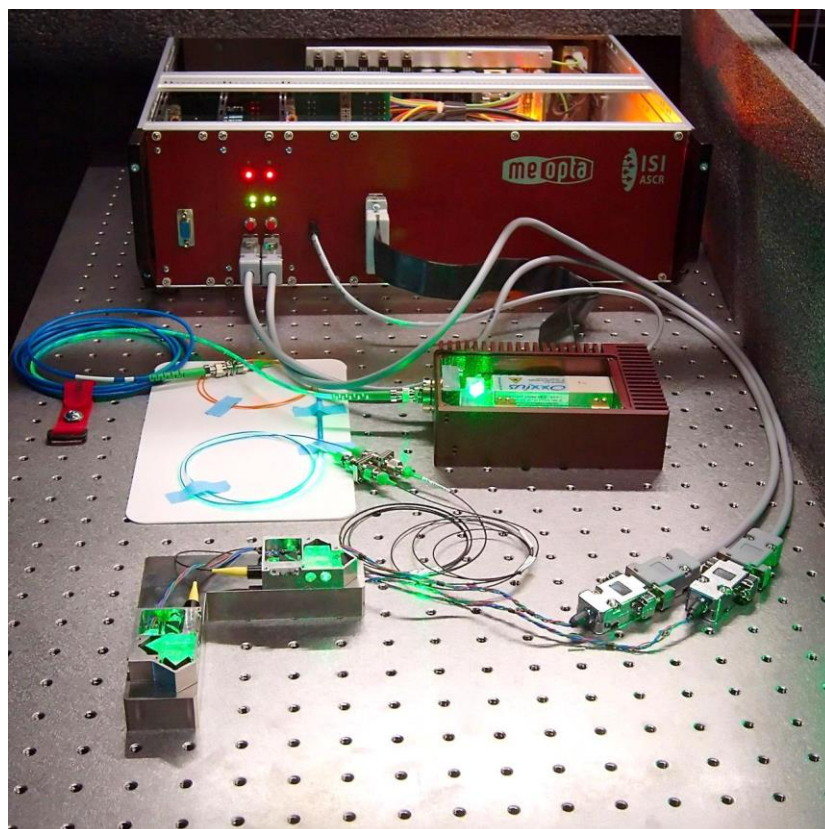
Výstupní svazek laseru je rozdělen na dvě části. Menší část výkonu (přibližně 5%) je využívána pro stabilizaci optické frekvence laseru pomocí absorpční kyvety. Zbytek

výkonu je směřován do vláknového portu umožňujícího přesné nastavení a tím vysokou účinnost navázání svazku laseru do vlákna.

Absorpční kyveta vyrobená z borosilikátového skla a naplněna parami molekulárního jodu je součástí skříně laseru. Délka kyvety (~10 cm) postačuje pro detekci silných absorpčních přechodů technikou lineární absorpční spektroskopie. Absorpční kyveta byla plněna na saturační teplotu. Tento způsob plnění absorpčních kyvet představuje významné zjednodušení technologie výroby kyvet i konstrukce vlastního stabilizovaného laseru, kdy není nutná stabilizace teploty kyvety [55]. Znamená to nastavit saturační teplotu při plnění kyvety na hodnotu nižší, než je nejnižší předpokládaná provozní teplota stabilizovaného laseru. V rozsahu provozních teplot je poté jód pouze v plynné fázi, což ve výsledku znamená jen málo se měnící tlak v kyvetě.

Laserový svazek je do interferometru přiveden prostřednictvím jednomodových, polarizaci zachovávajících optických vláken. Vlákná zde plní též roli filtru pro vlnovou délku 532 nm. Interní zdvojnásobení optické frekvence znamená přítomnost základní vlnové délky 1064 nm ve výstupním svazku, která však neovlivňuje ani stabilizaci laseru ani výstupní laserový svazek. Laser nabízí výstupní výkon cca 50 mW jednofrekvenčního záření.

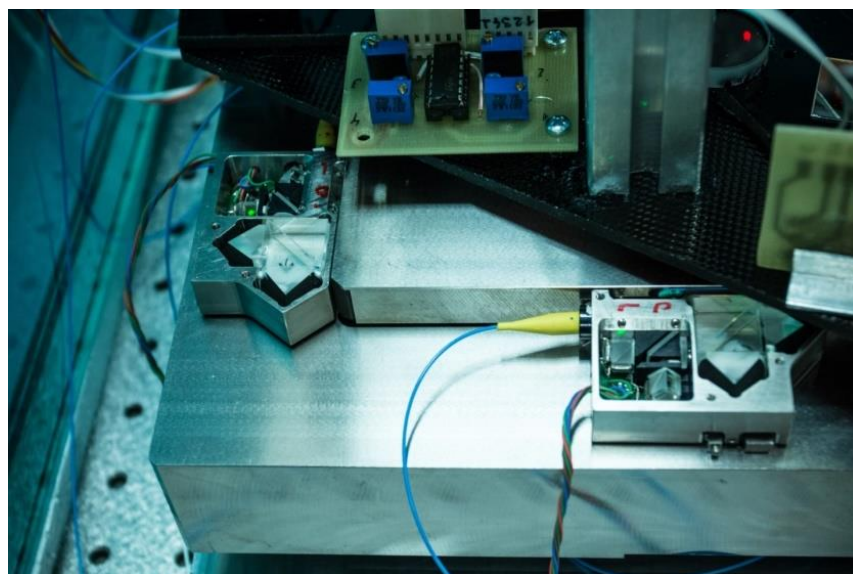
Elektronika je umístěna v modulární přístrojové skříně, která umožňuje rozšíření sestavy na více měřicích os. Jednotka pro kompenzaci vlivu indexu lomu vzduchu je v samostatné skříně se senzory tlaku, vlhkosti a obsahu CO₂ a umožňuje připojit více samostatných snímačů teploty. Jednotka je samostatná, aby ji bylo možné umístit do prostoru měření, a se zbytkem systému komunikuje prostřednictvím sériové sběrnice CAN. Software pro vyhodnocení naměřených dat zahrnuje grafické znázornění interferenční fáze v reálném čase, což je velmi užitečné pro přesné nastavování interferometrů. Odměřená vzdálenost je kompenzována na vliv indexu lomu vzduchu a zobrazována v nanometrech. Fotografie kompletního interferometrického systému pro souřadnicové odměřování je na obr. 4.2.6.



Obr. 4.2.6: Fotografie kompletního interferometrického systému pro souřadnicové (2D) odměřování s interferometrickými jednotkami, laserovým zdrojem, vláknovými komponenty a elektronikou

4.2.4 Instalace kompaktní interferometrické jednotky do systému pro odměřování v šesti stupních volnosti

Kompaktní interferometrická jednotka určená pro měření odrazem od rovinného zrcadla, jak je znázorněna na obr. 4.2.5, našla uplatnění v národním nanometrologickém etalonu. Jedná se o mikroskop atomárních sil (AFM – s pevným hrotem) umístěný na referenčním rámu, do kterého je vložen polohovací stolek se zkoumaným vzorkem. Přesná poloha vzorku se měří interferometricky. Detail rámu s instalovanými interferometrickými jednotkami je na obr. 4.2.7. Celkem je v systému nainstalováno šest těchto jednotek.

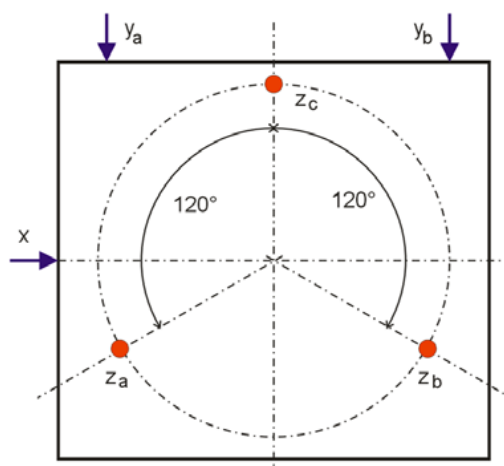


Obr. 4.2.7: Fotografie umístění kompaktních interferometrických jednotek v systému šestiosého odměřování pro nanometrologii

4.2.5 Požadavky na souřadnicové odměřování

Při souřadnicovém odměřování polohy vzorku vůči sondě pomocí interferometru je zásadním požadavkem eliminace Abbého chyby (tj. různost os měření a posuvu). Zachování Abbého principu vyžaduje přesné sesouhlasení průsečíku měřicích os v bodě hrotu – sondy. Dalším zásadním požadavkem systému je zachování ortogonalit souřadnic. To vyžaduje měření nebo lépe regulaci úhlů naklopení polohovacího stolku. Z těchto podmínek vyplývá odměřování ve více než třech základních osách.

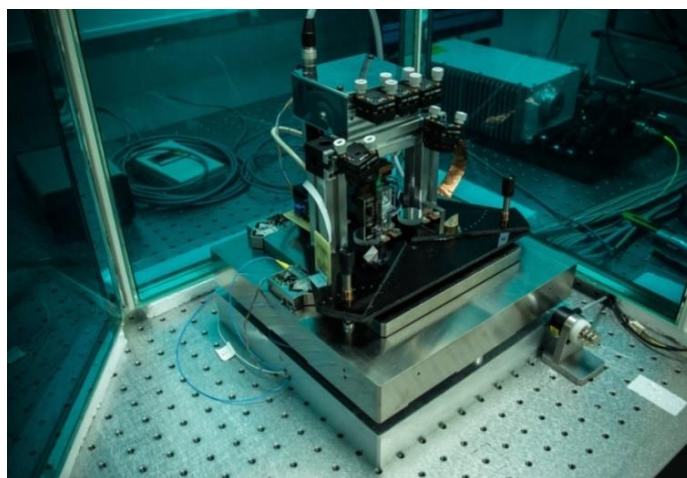
Konfigurace měřicích os pro vyhodnocení pohybů ve všech šesti stupních volnosti je schematicky na obr. 4.2.8. Měření úhlových odchylek více samostatnými interferometry představuje nejpřesnější možné vyhodnocení úhlů díky velké bázi ve srovnání např. s autokolimátory nebo interferometry kombinujícími měření délky a úhlu.



Obr. 4.2.8: Geometrická konfigurace šestiosého odměřování polohy stolku v nanometrologickém etalonu (6 samostatných měřicích bodů/interferometrů)

Rozlišení v měření úhlových chyb polohovacího mechanismu je s použitím interferometrického měření úhlů samostatnými interferometry s velkou bází dosažitelné na úrovni desítek nanoradiánů. Rozsah úhlových chyb při posuvu stolku je vzhledem k většímu rozsahu v horizontální rovině ve srovnání s odchylkami vůči vertikální ose výrazně větší, dosahuje téměř 10 mikroradiánů.

Uvedený systém splňuje požadavky metrologické návaznosti měření na základní etalon délky díky integrovanému stabilizovanému laseru napájejícímu interferometrické jednotky, viz obr. 4.2.9. Systém, na kterém jsou jednotky využity, může být východiskem pro návrh dalších víceosých měřicích systémů jak pro nanometrologii s mikroskopií s lokální sondou a s velkým rozsahem polohování (long-range), tak pro nanometrologické systémy kombinující elektronovou mikroskopii s interferometrickým odměřováním.



Obr. 4.2.9: Fotografie výsledného AFM mikroskopu s interferometrickým odměřováním polohy stolku pro nanometrologii. Systém je provozován v ČMI

4.3 DIFERENČNÍ INTERFEROMETR PRO ODMĚŘOVÁNÍ POLOHY VZORKU V KOMOŘE ELEKTRONOVÉHO LITOGRAFU

Tento projekt se nazývá „Platforma pokročilých mikroskopických a spektroskopických technik pro nano a mikrotechnologie“ a je financován Technologickou agenturou České republiky. Řešitelem tohoto projektu je Vysoké učení technické v Brně/Fakulta strojního inženýrství a spoluřešitelé jsou ON Semiconductor Czech republic, s.r.o., Optaglio s.r.o., Tescan Brno, s.r.o. (Tescan) a Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i. (ÚPT) [56]. Tento projekt je rozdělen celkem do devíti pracovních balíčků. V rámci projektu jsem zapojena do prvního pracovního balíčku s názvem: *Specializovaný elektronový litograf s energií svazku až 80 keV*.

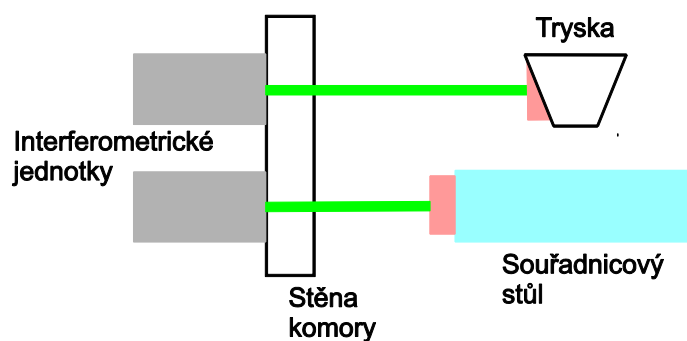
Cílem je realizovat elektronový litograf jako komerční produkt určený především pro univerzity a výzkumné organizace. Pracuji na návrhu a realizaci interferometrického odměřovacího systému, návrhu laserového zdroje a detekční techniky pro souřadnicové odměřování polohovacího stolku elektronového litografu. Tento interferometrický odměřovací systém by měl splňovat definované požadavky, kterými jsou: precizní „sešití“ více jednotlivých zápisových polí (o velikosti řádově několika set mikrometrů) v jednu velkou plochu (typicky v rozsahu od 100 mm² až do 100 cm²), přičemž cílové rozlišení měření se má pohybovat v řádu jednotek nanometrů, opakovatelnost pojezdu na polohu lepší než 50 nm.

Z hlediska koherentní interferometrie délky, resp. polohy se nejedná o nikterak extrémní nároky, zvláště když bude odměřování probíhat ve vakuu, čímž odpadá významný zdroj nejistoty (fluktuace indexu lomu prostředí).

4.3.1 Dlouhodobé měření mechanické stability komory litografu

Hlavním limitujícím faktorem rozlišení resp. přesnosti u interferometrického odměřování není interpolace interferenčního proužku, ani šum laseru či elektroniky, ale především mechanická stabilita celé měřicí sestavy. Důležitá je tuhost referenčního rámu a jeho teplotní dilatace. Při návrhu interferometrů bylo počítáno s tím, že jednotky interferometru budou umístěny na stěny vakuové komory. V takovém případě lze očekávat jak deformace způsobené změnami tlaku (evakuace), tak i v důsledku teplotních dilatací materiálu.

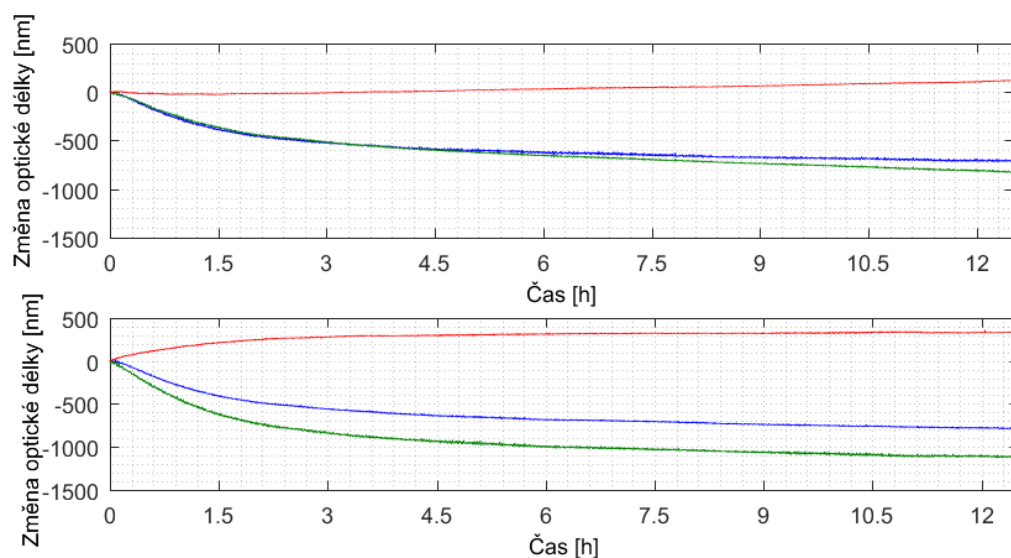
Jedno z prvních měření, které jsem v rámci projektu realizovala, bylo dlouhodobé měření mechanické stability vakuové komory litografu. Vzhledem k výše očekávatelným efektům mechanické deformace se jako optimální jevílo použití diferenčního principu interferometrického odměřování. V první fázi experimentů jsem použila dva samostatné interferometry, jeden pro každou měřicí osu (viz obr. 4.3.1) a rozdíl jsem stanovila výpočtem. Tímto způsobem jsem získala původní údaje ze všech jednotek, které mi daly informaci o deformacích vakuové komory.



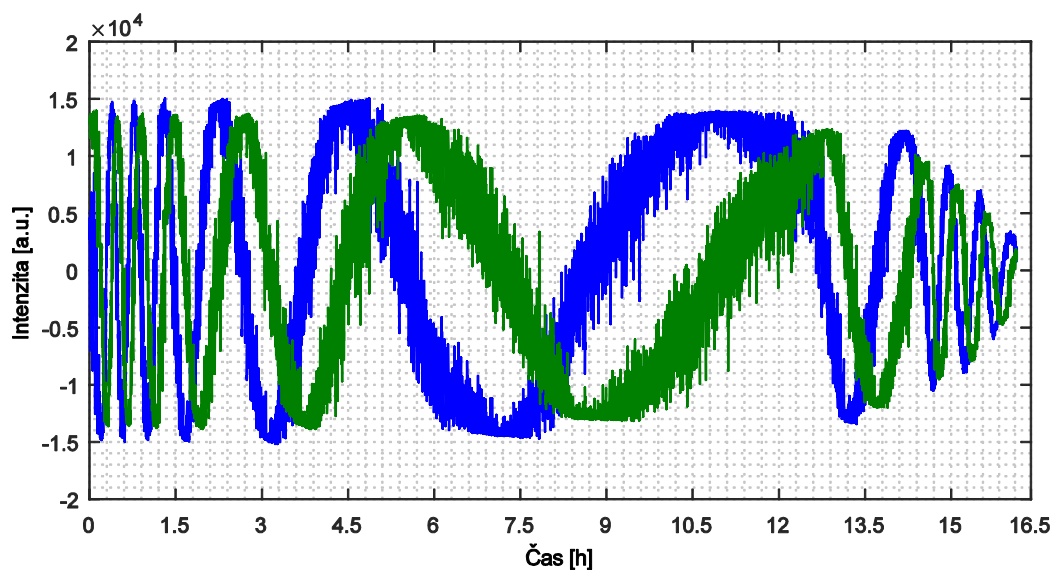
Obr. 4.3.1: Schematické uspořádání dvou interferometrických jednotek pro diferenční měření v jedné ose obrazem od rovinných zrcadel. Uspořádání použito při měření dlouhodobé mechanické stability komory litografu

Dlouhodobou stabilitu komory litografu jsem měřila ve statickém režimu stolku s interferometrickými jednotkami popsány v odstavci 3.3.2. Měřila jsem ve dvou osách X, Y s použitím homodynní detekce. Interferometry jsem měřila změnu optické délky vůči komoře litografu a elektronové trysce (jak bylo řečeno v komentáři výše). Měření probíhalo v evakuované komoře, tudíž nebylo ovlivněno změnami indexu lomu prostředí. K měření jsem použila pevnolátkový Nd:YAG laser o vlnové délce 532 nm.

Záznam dlouhodobého měření stability komory je na obr. 4.3.2. Horní záznam odpovídá měření v ose X a spodní záznam v ose Y. Rychlý náběh, který je na záznamu patrný, představuje tlakovou deformaci komory způsobenou evakuací. Pomalé změny představují teplotní dilatace materiálu. Změna optické délky při dlouhodobém měření se v ose X pohybuje na úrovni do 120 nm a v ose Y do 340 nm. Na obr. 4.3.3 je záznam, který představuje signály I_x a I_y z homodynní detekce. Jedná se o průběh intenzity interference I_x a I_y původní komplexní vlny. Jak je ze záznamu zřejmé, dochází během měření ke změně amplitudy obou signálů. Tato změna je patrně způsobená úhlovými deformacemi komory, čímž dochází ke snížení kontrastu. Oba signály jsou také zatíženy šumem způsobeným s největší pravděpodobností mechanickými vibracemi.



Obr. 4.3.2: Časový záznam dlouhodobé stability komory litografu při vyčerpání. Horní záznam – měření v ose X, spodní záznam v ose Y: modrá křivka – komora litografu, zelená křivka – elektronová tryska, červená křivka – rozdíl. Rychlý náběh na záznamech představuje tlakovou deformaci komory způsobenou evakuací. Pomalé změny představují teplotní dilatace materiálu. Změna optické délky se v ose X pohybuje na úrovni do 120 nm a v ose Y do 340 nm



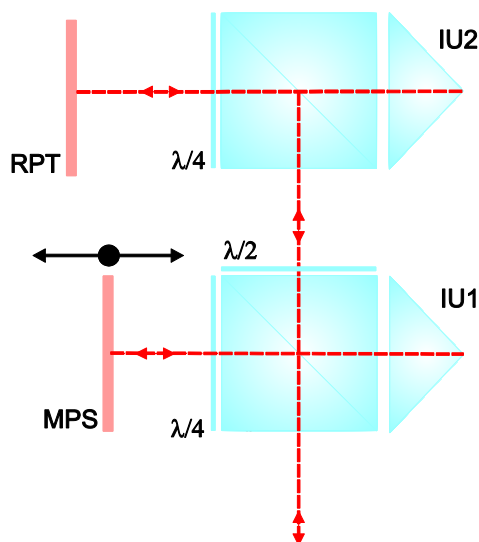
Obr. 4.3.3: Časový záznam představující signály I_x , I_y z homodynní detekce. Jedná se o průběh intenzity interference I_x a I_y původní komplexní vlny

4.3.2 Optická sestava diferenčního interferometru

Na základě výsledků předchozího měření deformací komory jsem navrhla finální uspořádání interferometru. Uspořádání interferometru pro měření polohy stolu elektronového litografu vychází z diferenčního principu. Koncept diferenčního měření předpokládá vztažení referenční plochy k bodu, který nejlépe představuje vztažné místo soustavy. V tomto systému je tímto bodem elektronová tryska litografu. Vztažení vůči tomuto bodu účinně potlačí vlivy deformací vakuové komory způsobené teplotními a tlakovými změnami. Je-li cílem rozlišení a přesnost na nanometrové úrovni, hrají tyto vlivy zásadní roli. Pro souřadnicové odměřování je nutná konfigurace s rovinným koncovým zrcadlem, neboť příčný pohyb odrazného prvku vylučuje použití koutového hranolu.

Zvolila jsem uspořádání, které respektuje referenční a měřicí zrcadla nad sebou, na každé jsou směřovány dva svazky a v obou drahách jsou umístěny koutové odražeče kompenzující malé úhlové odchylky. Schematicky je optické uspořádání znázorněno na obr. 4.3.4.

Optická vlna prochází interferometrickou jednotkou (IU1), na dělicí rovině se rozdělí na referenční a měřicí. Odražená měřicí optická vlna (MOV) dopadá na zrcadlo stolku (MPS – měřicí plocha – stolek) celkem dvakrát. Referenční optická vlna (ROV) prochází přímo a vstupuje do interferometrické jednotky (IU2). Odrazí se na dělicí rovině IU2 a dopadá na zrcadlo referenční plochy (RPT – referenční plocha – tryska) opět dvakrát. Optické vlny se po projití svými příslušnými drahami rekombinují na dělicí rovině IU1 a vstupují do fotodetektoru.



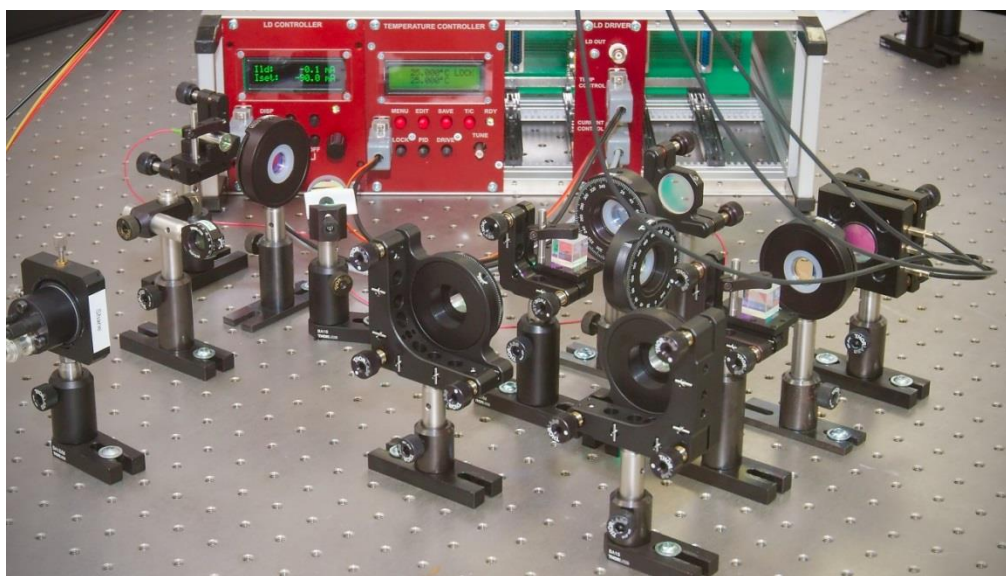
Obr. 4.3.4: Schéma optického uspořádání interferometru pro diferenční měření v jedné ose odrazem od rovinných zrcadel umístěných nad sebou. Horní svazky představují referenční trasu, dolní svazky měřicí trasu. Optická vlna prochází spodní interferometrickou jednotkou (IU1), na dělicí rovině se rozdělí na referenční a měřicí. Měřicí optická vlna (MOV) se odráží a dopadá na

zrcadlo stolku (MPS – měřicí plocha – stolek) celkem dvakrát. Poté se na dělicí rovině IU1 odráží a vystupuje z optické sestavy. Referenční optická vlna (ROV) prochází přímo a vstupuje do horní IU2. Na dělicí rovině IU2 dochází k odrazu. ROV dopadá na zrcadlo referenční plochy (RPT – referenční plocha – tryska) celkem dvakrát a poté se vlna na dělicí rovině IU2 odráží a prochází přes IU1 ven z optické soustavy. Na výstupu se rozdělená optická vlna spojí a vstupuje do detekční části systému. $\lambda/2$: půlvlnná destička, $\lambda/4$: čtvrtvlnná destička

Optická část diferenčního interferometru se skládá z dělicího hranolu, koutového hranolu a čtvrtvlnných ($\lambda/4$) a půlvlnných ($\lambda/2$) destiček. Dělicí polarizační hranoly jsou z materiálu SF 14 o rozměrech 15 mm x 15 mm x 15 mm, koutové hranoly jsou vyrobeny z materiálu BK 7 o průměru 15 mm a $\lambda/4$, $\lambda/2$ destičky jsou z krystalického křemene o průměru 15 mm, byly dodány firmou CASIX. Veškeré tenké vrstvy jsou optimalizované na oblast vlnových délek 1550 ± 25 nm. Minimální a maximální rozdíl optických drah je 24 mm a 244 mm.

4.3.3 Ověření funkce interferometru

Ověření funkce interferometru probíhalo v laboratorních podmínkách. Optickou sestavu jsem uspořádala na optickém stole v univerzálních stojácích, jak je patrné z obr. 4.3.5.



Obr. 4.3.5: Fotografie uspořádání jedné osy optické sestavy interferometru pro diferenční měření – ověření funkce

V konfiguraci jsem použila optiku, která byla již přímo vyrobena pro použití v komoře litografu. Cílem bylo prověřit diferenční měření a obeznámit se s procesem nastavování jednotlivých optických prvků interferometru. Také jsem si kladla za cíl vybrat nejvhodnější kombinace optických prvků tak, aby se jejich případné optické chyby (především

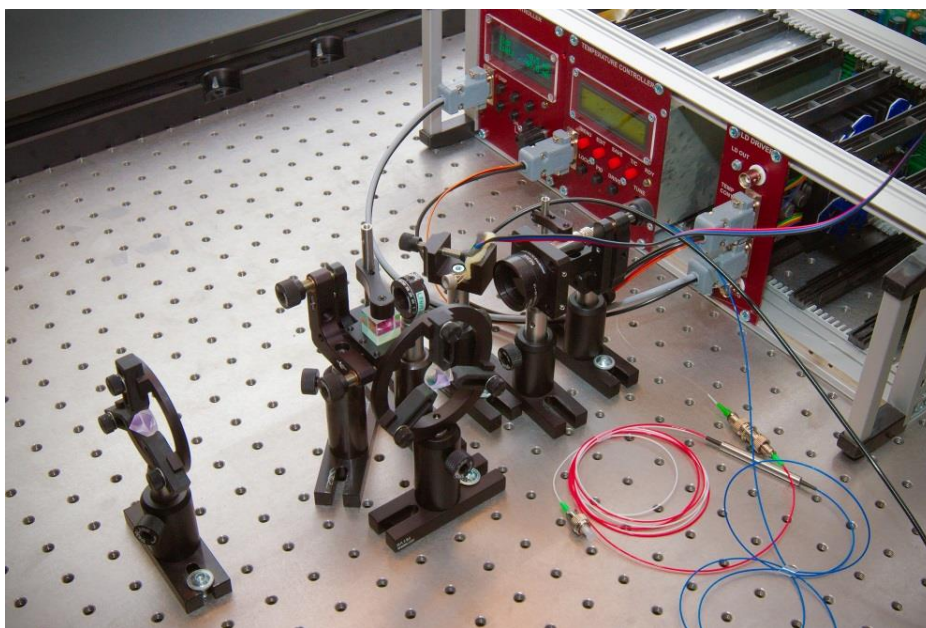
deformace vlnoploch) navzájem alespoň částečně kompenzovaly. Kritériem bylo dosažení co nejvyššího interferenčního kontrastu.

Detekce interferenčního signálu zde nevyužívala kvadrurní demodulace (vývoj a princip detekce popsán v odstavci 4.3.4 a 4.3.5), neboť pro stanovení úrovně kontrastu postačovalo pouhé zobrazení interferenčního signálu v jedné signálové trase pomocí osciloskopu. Všechny zpožďovací desky byly vloženy do přesných rotačních držáků a také držáky hranolů interferometru umožňovaly přesné úhlové nastavení. Koncová zrcadla interferometru byla již rovinná, tak jak budou ve finální sestavě, přičemž jedno z nich jsem upevnila do polohovatelného držáku s piezoelementy. Piezoelementy po přivedení střídavého signálu kmitaly s držákem zrcadla. Měnila se měřená vzdálenost a na výstupu jsem získala trvalý interferenční signál.

Přes značnou optickou složitost sestavy diferenčního měření se ukázalo, že nastavení optické trasy je reálně proveditelné. Postupnými kroky, pečlivým měřením výkonu a vyhledáváním maxim a minim výkonu v jednotlivých místech interferometru se mi podařilo dosáhnout vynikající hodnoty kontrastu na úrovni 99,8% a to bez nutnosti vybírat a párovat optické prvky. K tomuto výsledku přispívá dlouhá vlnová délka použitého infračerveného laserového zdroje, kdy se nerovnosti optických povrchů projeví ve fázové deformaci vlnoploch méně než v případě použití kratší vlnové délky z viditelné oblasti elektromagnetického spektra.

4.3.4 Chování laserového zdroje a testování detekčního systému

Pro potřeby tohoto projektu jsem realizovala experimentální sestavu interferometru, fotografie na obr. 4.3.6. Za účelem prověření chování různých laserových zdrojů, jejich koherenčních vlastností a fázového/frekvenčního šumu v reálném provozu interferometru. Také jsem na této sestavě testovala první verzi hybridního, analogově/digitálního detekčního systému.



Obr. 4.3.6: Fotografie testovací sestavy interferometru pro měření v jedné ose s koutovými odražeči, vysokofrekvenčním fotodetektorem a předzesilovačem

Parametry různých laserových zdrojů byly měřeny ve skříně s elektronikou vyrobenou na ÚPT. Obsahovala digitální proudový a teplotní kontrolér a kartu s patičí pro laserovou diodu v pouzdře „butterfly“. Měření proběhlo se dvěma typy laserových diod, v obou případech se jednalo o diody typu DFB (*Distributed Feedback Laser*), s mřížkovou strukturou a s optovláknovou mřížkovou zpětnou vazbou (tzv. „self injection locking“). Diody měly podle katalogových údajů pracovat v jednofrekvenčním režimu, s šířkou čáry v řádu desítek, nanejvýš stovek kHz.

Dioda fy. AOS vykazovala nestabilitu při ladění a nepravidelné frekvenční / modové přeskoky, pravděpodobně způsobené zpětnými odrazy ve vyvázání do optického vlákna přímo v pouzdře diody. Tyto efekty nebylo možné účinně potlačit, a jak se ukázalo při pokusném provozu interferometru, způsobovaly diskontinuity v naměřené veličině. Proto jsem tuto laserovou diodu nahradila dražším laserem od fy. TOPTICA, který již obsahoval integrovaný optický izolátor přímo v pouzdře diody.

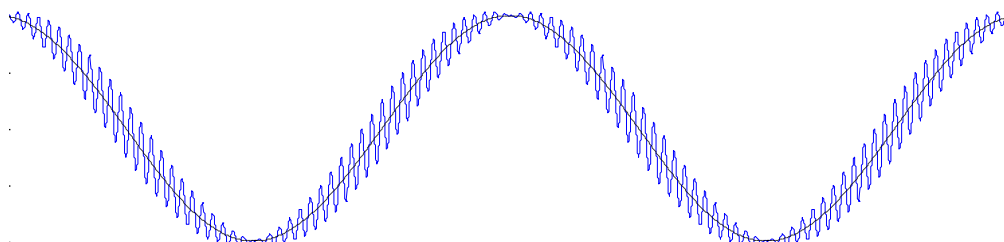
Pro první testování hybridní, analogově/digitální detekční techniky byly použity analogové směšovače MiniCircuits, připravovaná jednotka přímé kmitočtové syntézy pro modulaci laserové diody a pro generaci referenčního signálu pro směšování byla nahrazena laboratorním generátorem. Byly sestaveny oba kanály kvadratického fázového rozkladu, jeden přímý, odvozený od detekovaného signálu a druhý generovaný synteticky synchronní detekcí modulačního signálu. Oba signály po průchodu stejnosměrně vázanými zesilovači a dolními propustmi byly následně digitalizovány kartou pro detekci interferenčního signálu. Detekce pracovala s modulačním kmitočtem 3 MHz s velmi dobrým poměrem signál/šum, bez zřetelného vlivu nelinearit interpolace interferenčního proužku (obvykle nazývané „cyklická chyba interferometru“). Toto lze považovat za

významnou výhodu metody ve srovnání s optickou detekcí, kde se na nelinearitě podepíší deformace vlnoploch a nepřesnosti polarizační optiky. Ukázalo se však, jak velká je závislost diskriminačního poměru interferometru pro demodulaci frekvenční modulace laseru. Toto se projevuje změnou poměru amplitud signálů tvořících kvadraturu. Je to dáno velkým rozsahem pohybu stolu, jehož polohu měříme. Z původního předpokladu kompenzace postprocesingem po digitalizaci muselo být z důvodu velké ztráty dynamiky ustoupeno a byly doplněny regulační smyčky pro řízení analogového zisku v syntetické větvi kvadrurního signálu.

4.3.5 Nová metoda detekce interferenčního signálu

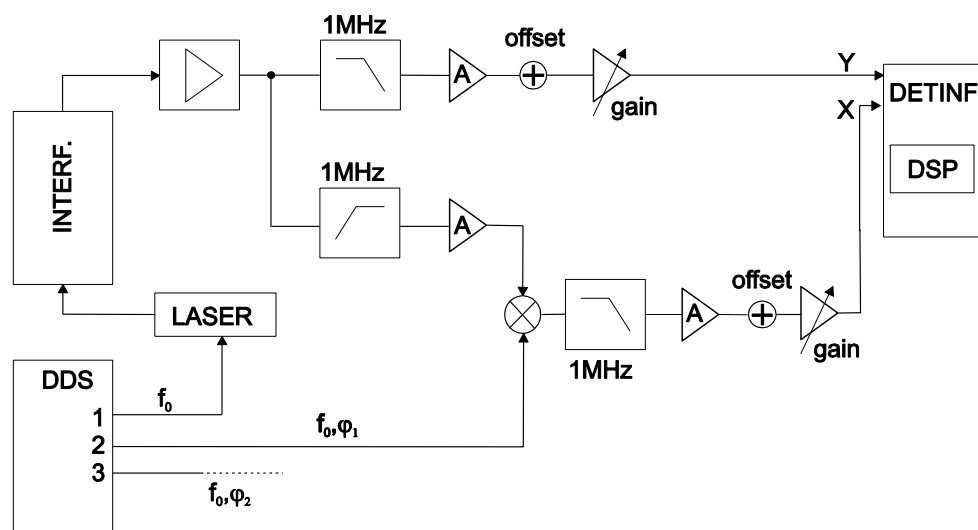
Detekční metoda, která byla vyvinuta pro potřeby diferenčního odměřování v komoře elektronového litografu, využívá vysokofrekvenční modulaci optické frekvence laseru pro získání komplementárních signálů kvadrurního fázového rozkladu.

Intenzita interferenčního signálu snímaná fotodetektorem obsahuje dvě složky, které jsou schematicky znázorněny na obr. 4.3.7. Nízkofrekvenční složka intenzity odpovídá kosinu interferenční fáze. Vysokofrekvenční složka signálu je tvořena harmonickým signálem, jehož frekvence je rovna modulační frekvenci laseru. Pro malé modulační zdvihy laserový interferometr funguje zároveň jako diskriminátor optické frekvence laseru, jehož strmost je rovna derivaci výše zmíněné nízkofrekvenční složky intenzity. Amplituda vysokofrekvenční složky intenzity je pak tedy úměrná sinu interferenční fáze.



Obr. 4.3.7: Schematicky znázorněna nízkofrekvenční a vysokofrekvenční složka intenzity interferenčního signálu snímaná fotodetektorem. Nízkofrekvenční složka intenzity odpovídá kosinu interferenční fáze. Vysokofrekvenční složka signálu je tvořena harmonickým signálem, jehož frekvence je rovna modulační frekvenci laseru

Blokové schéma detekčního řetězce je na obr. 4.3.8. Signál Y je získáván prostým měřením intenzity interference a odfiltrováním vysokofrekvenční složky. Sinový signál X se získává pomocí synchronní amplitudové demodulace vysokofrekvenční složky intenzity.



Obr. 4.3.8: Blokové schéma detekčního řetězce. Signál Y je získáván prostým měřením intenzity interference a odfiltrováním vysokofrekvenční složky. Signál X se získává pomocí synchronní amplitudové demodulace vysokofrekvenční složky intenzity. Signály se digitalizují a digitálně zpracovávají v reálném čase pomocí signálového procesoru (DSP) a počítá se z nich interferenční fáze a jednotlivé interferenční proužky. DDS: deska přímé digitální syntézy modulačního a referenčního signálu

Postup analogového zpracování signálu z fotodetektoru je následující: Signál z fotodetektoru je filtrací dolní a horní propustí rozdělen na dvě složky do dvou větví zapojení – nízkofrekvenční do 1 MHz a vysokofrekvenční nad 1 MHz. Nízkofrekvenční signál je dále pouze zesílen stejnosměrně vázaným zesilovačem a upraven jeho stejnosměrný offset a získáváme složku Y (odpovídá sinu interferenční fáze).

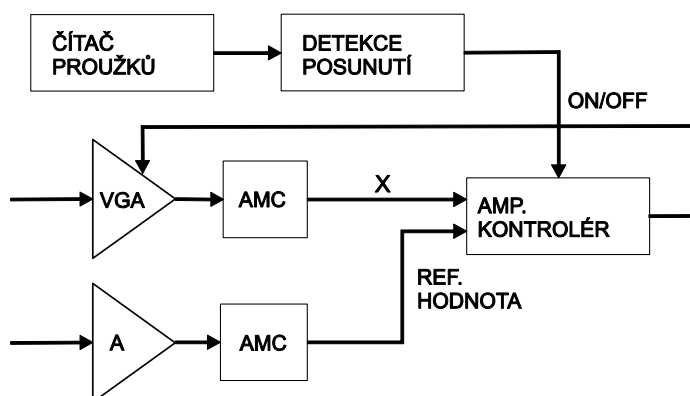
Ve vysokofrekvenční části zapojení je prováděna synchronní detekce obálky syntetického vysokofrekvenčního signálu. Signál je nejdříve zesílen vysokofrekvenčním zesilovačem se střídavou vazbou, následně je pomocí dvojité vyvážené směšovače analogově realizována operace násobení referenčním signálem. Výsledný signál po analogovém násobení je filtrací dolní propustí zbaven nepotřebných vysokofrekvenčních složek. Po zesílení a korekci offsetu získáváme složku X (odpovídá cosinu interferenční fáze). Tyto signály se dále digitalizují a digitálně zpracovávají v reálném čase pomocí signálového procesoru (DSP) a počítá se z nich interferenční fáze a jednotlivé interferenční proužky.

Elektronika pro detekci interferenčního signálu byla realizována v modulární podobě a umožňuje zpracování signálů z obou os odměřování. Elektronika je rozdělena na čtyři funkční celky umístěné na samostatných kartách v univerzální přístrojové skříni:

- Analogový front-end pro zesílení a demodulaci signálu z fotodetektoru.
- Deska přímé digitální syntézy modulačního a referenčních signálů (DDS).
- Deska digitalizace a dekodéru interferenční fáze.
- Deska enkodéru inkrementálního signálu pro kontrolér krokových motorů.

Pracovní kmitočet modulace frekvence laseru je 4 MHz, s dostatečnou rezervou pro maximální rychlost pohybu souřadnicového stolu 5 mm/s. Tomu odpovídá pracovní šířka pásma detekčního řetězce a nastavení analogových filtrů.

Rozsah posuvu stolku představuje významnou změnu rozdílu délky ramen interferometru. To s sebou nese změnu strmosti frekvenčního diskriminátoru a následně změnu amplitudy detekovaného modulačního signálu v syntetické ose. Rozdíl je přibližně 400%. Proto bylo nutné realizovat adaptivní řízení zisku v syntetické signálové trase synchronní detekce. Blokové schéma algoritmu je na obr. 4.3.9.



Obr. 4.3.9: Blokové schéma algoritmu – adaptivní řízení zisku v analogové detekční části řetězce detekce interferenčních proužků. A – zesilovač, VGA – zesilovač s řízením zisku, AMC – výpočet amplitudy

Algoritmus a grafické uživatelské rozhraní (ukázkový screenshot na obr. 4.3.10) byly implementovány v obslužném PC pomocí vývojového prostředí LabView určeného k řízení experimentů.

Amplituda v syntetické vysokofrekvenční větvi je z principu funkce metody odvozena od amplitudy v přímé větvi. Při odlaďování programu se ukázalo jako klíčové vyhodnocení referenční amplitudy v přímé nízkofrekvenční větvi, kde bylo nutné nalézt postupy odlišující signál od šumu a různých nestandardních pohybů interferometru, jako jsou např. vibrace. Dále se ukázalo, že stejnosměrně vázaný detektor vykazuje při pohybu stolu drift offsetu způsobený úhlovými chybami vedení stolu a následně pohybem odraženého svazku laseru na ploše fotodetektoru. To se navíc projevovalo změnami v interferenčním kontrastu. Proto musel být algoritmus doplněn o adaptivní řízení offsetu detekovaného signálu. Systém je obdobný jako při řízení zisku v syntetické větvi.



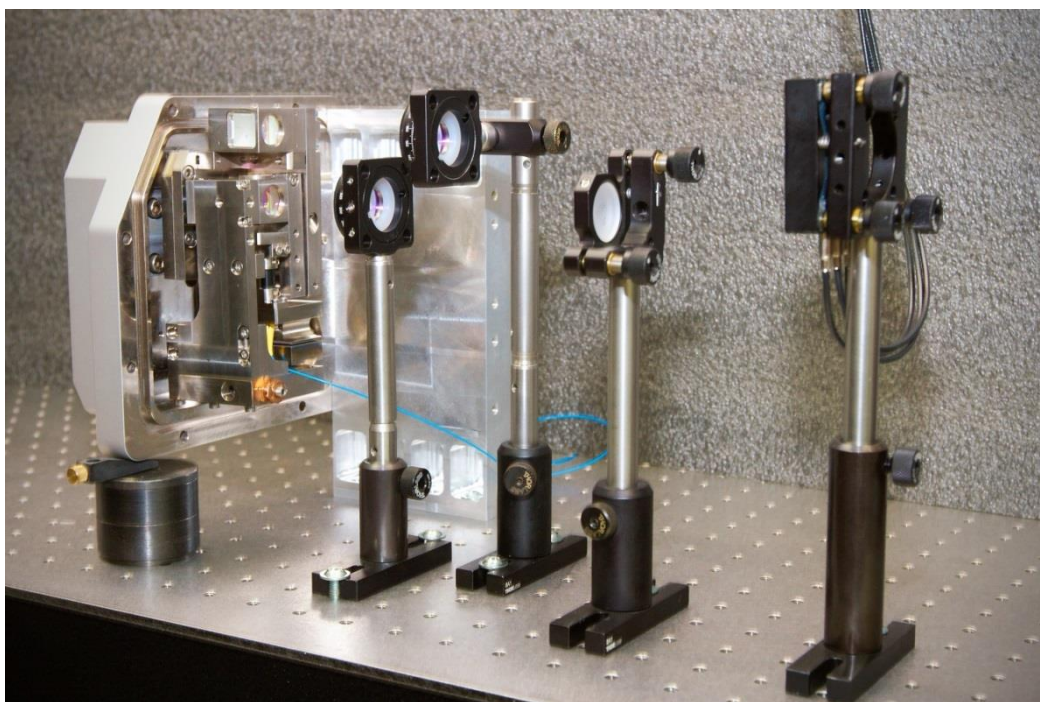
Obr. 4.3.10: Uživatelské rozhraní pro grafické znázornění interferenčních signálů v reálném čase. Vývojové prostředí LabView

4.3.6 Montáž interferometru a instalace do komory elektronového litografu

Po vlepění jednotlivých optických komponent do klecí následovala finální montáž interferometrů do příruby vakuové komory. Jednotlivé mechanické díly sestavy jsem obdržela od fy. Tescan.

Interferometrické jednotky jsou umístěny v kovových pouzdech s více stupni volnosti. Tento koncept si klade za cíl umožnit nezávislé úhlové nastavení měřicího i referenčního ramene každého interferometru a také nezávislé úhlové nastavení optovláknového kolimátoru přivádějícího laserové světlo do interferometru.

Kolimátor je stavitelný ve čtyřech stupních volnosti, dvou úhlových a dvou stranových. Interferometrické jednotky pro měřicí i referenční ramena jsou navrženy se dvěma stupni volnosti ve dvou úhlových osách. Nastavení umožňují šrouby s jemným stoupáním (4 ot/mm). Volba tohoto náročného mechanického řešení umožňuje kompenzovat úhlové chyby nastavení měřicího a referenčního zrcadla a zároveň dovoluje prověřit problémy nastavení, se kterými se bude interferometr potýkat během svého reálného provozu. V první fázi jsem vše sestavila na optickém stole v laboratoři, viz obr. 4.3.11.



Obr. 4.3.11: Fotografie příruby vakuové komory s optomechanikou interferometru pro diferenční měření v jedné ose

V laboratorní sestavě jsem nahradila referenční a měřicí úhlová zrcadla rovinnými zrcadly a zpoždovací desky ponechala na přesných rotačních držácích. V této sestavě jsem ověřila postupnou metodu nastavení všech optických prvků tak, jak předpokládal mechanický návrh. Klíčové prvky nastavení, tj. úhlové stupně volnosti pro jednotlivé osy měření jsou přístupné i vakuovými průchodkami z vnějšku komory.

Kompletní instalace celého interferometrického systému proběhla v čistých laboratořích fy. Tescan. Fotografie komory litografu je na obr. 4.3.12. Prvním krokem bylo přesné sesouhlasení referenčního a měřicího zrcadla. Pomocí autokolimátoru jsem sesouhlasila odrazné plochy zrcadel vůči sobě. Referenční zrcadlo je přilepeno na trysce elektronového litografu a měřicí zrcadlo na posuvném stolku lze v malém rozsahu nastavit vůči referenčnímu zrcadlu pomocí stavitelných prvků.

Dále následovalo vložení příruby s interferometry do komory litografu a jejich nastavení vůči referenčnímu a měřicímu zrcadlu. Laserový svazek je veden pomocí optických vláken typu PM (polarizaci zachovávajících), výkon laserového zdroje je nastavitelný pomocí vláknového atenuátoru a do komory litografu je svazek přiveden přes vakuovou průchodku. V komoře litografu je umístěn vláknový dělič, který laserový svazek rozděluje v poměru cca 50:50 do dvou měřících os.

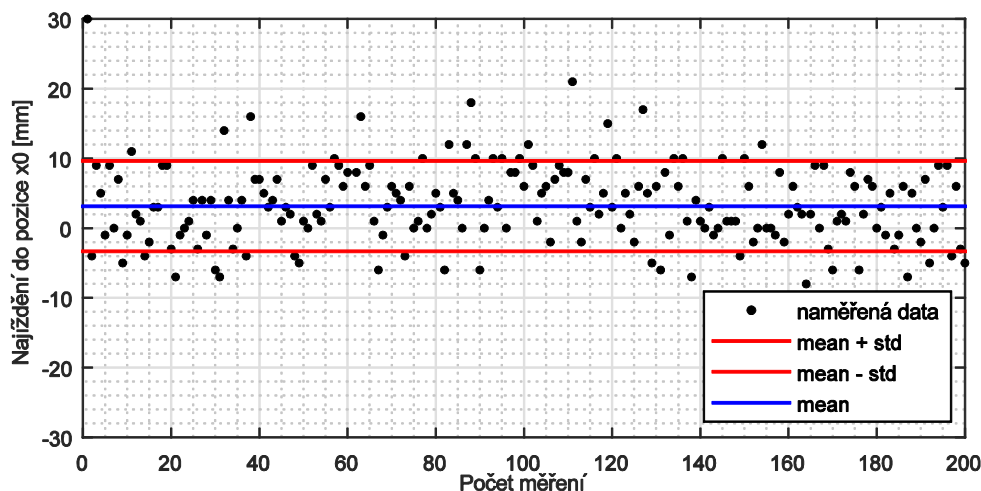
Zdrojem laserového záření je ve výsledném uspořádání jednofrekvenční Laser RIO Orion (Redfern Integrated) s velmi úzkou spektrální čarou (~ 5 kHz), výstupním optickým výkonem 10 mW a vlnovou délkou 1530 nm. Tato vlnová délka byla zvolena z důvodu

vysoké citlivosti detektorů uvnitř komory litografu na záření z viditelné spektrální oblasti (zamezení vlivu rozptýleného světla z interferometru na vlastní měřicí části litografu).



Obr. 4.3.12: Komora litografu s polohovacím souřadnicovým stolem a interferometry instalovanými do stěn komory

Celý systém se podařilo bez větších komplikací zprovoznit a nyní probíhají ověřovací měření parametrů celého systému v reálném provozu. Jedním z doposud získaných výsledků je měření opakovatelnosti pohybu polohovacího stolku v rámci os X a Y v podobě „closed loop“. Zjištěná opakovatelnost polohování se pohybuje na úrovni menší než 20 nm. Záznam najíždění stolku do pozice X0 je na obr. 4.3.13, naměřená data byla poskytnuta kolegy z fy. Tescan.



Obr. 4.3.13: Záznam najíždění stolku litografu do pozice X_0 . Data poskytnuta spoluřešitelem projektu firmou Tescan

Během prvních testovacích měření se ukázalo, že mechanická tuhost a stabilita uložení optických prvků není zcela dostačující. Dochází k dlouhodobým driftům a rozladění interferometrických jednotek z důvodu nedostatečné tuhosti pružin a pevnosti čepu, který umožňuje nastavení interferometrických jednotek. Proto kolegové z fy. Tescan s mým přispěním navrhuji novou mechaniku interferometru, která bude použita ve finální komoře elektronového litografu.

I přes použití polarizací zachovávajících optických vláken jsem již při prvním zprovoznění interferometrů pozorovala změny polarizace v optovláknové trase způsobené vlivy okolního prostředí (změny teploty prostředí, mechanické namáhání vláken). Řešením tohoto problému je optická vlákna zkrátit na co nejmenší délku a navařit zpět optické konektory nebo optická vlákna svařit pomocí optovláknové svářečky.

U detekční techniky je problematické adaptivní řízení zisků a offsetů z důvodu zpoždění signálů zpracováním přes PC (rychlost odezvy systému). Jednou z možností řešení tohoto problému je konverze výpočetního algoritmu z prostředí LabView do rychlého DSP procesoru. Druhou možností je vyzkoušení tradiční homodynní detekce. Při té je však problematická použitá infračervená vlnová délka, s níž souvisejí vysokofrekvenční fotodetektory s dostatečně velkou aktivní plochou a obtížné nastavení složité optiky na okem neviditelnou infračervenou vlnovou délku. Pro tento systém by se jednalo o alternativní řešení, které by ukázalo přednosti a nedostatky obou metod. Rovněž by to umožnilo použít homodynní detekci s infračervenou vlnovou délkou u jiných interferometrických systémů, kde teď není k dispozici.

KAPITOLA 5

5 UPLATNĚNÍ A VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ APLIKOVANÉHO VÝZKUMU

Tato kapitola je zaměřená na využití výsledků aplikovaného výzkumu. Jedná se o využití interferometrických jednotek, které vznikly díky společnému projektu mezi ÚPT a fy. Meopta, zmíněnému v kapitole 4 odstavci 4.2. Jedná se o využití diferenčního interferometru pro měření vysokocyklové únavy vzorků kovů.

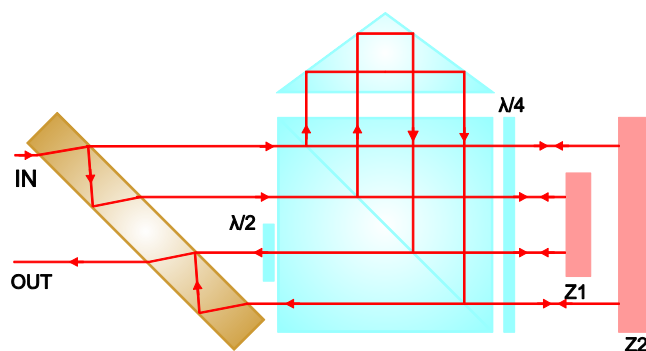
5.1 MĚŘENÍ VIBRACÍ POMOCÍ DIFERENČNÍHO INTERFEROMETRU

Měření vysokocyklové únavy vzorků kovů s využitím diferenčního interferometru probíhá ve spolupráci s Ústavem fyziky materiálu, AV ČR, v.v.i. (ÚFM), který disponuje přístrojem pro namáhání vzorků kovů v režimu gigacyklové únavy (10^{10} cyklů). Snahou je toto zařízení doplnit o interferometrické odměřování, které by umožňovalo měření deformace v reálném čase. Takovéto zařízení by umožňovalo získat informace o průběhu pružné i nepružné deformace, počátcích vzniku únavových trhlin a jejich vývoje. Výsledky z pozorování a studování těchto dějů mohou být přínosem jak pro základní poznání mechanismu únavového poškození, tak i pro inženýrskou praxi.

5.1.1 Diferenční uspořádání interferometru

Diferenční měření interferometrem je tradiční etablovanou technikou, která se uplatňuje v systémech, kde je potřebné eliminovat vliv dilatací mechaniky měřicí sestavy. Co do výsledné přesnosti je mechanická stabilita jedním z klíčových parametrů.

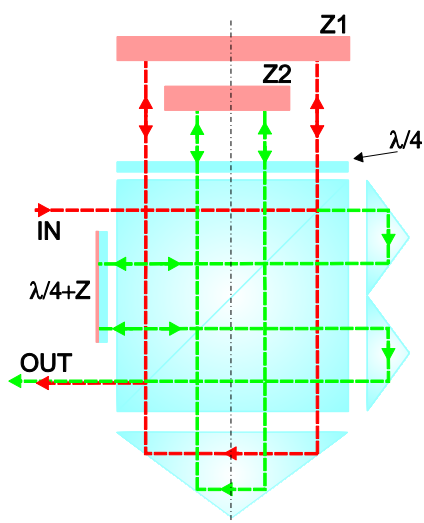
Při návrhu tohoto interferometru jsem vycházela z používaného řešení Jaminova interferometru, který je schematicky na obr. 5.1.1 [57].



Obr. 5.1.1: Schéma Jaminova interferometru používaného pro diferenční měření. Optická vlna se na dělicí desce rozdělí na referenční a měřicí. Procházejí stejnou optickou soustavou s laterálním posuvem. Referenční optická vlna se odrazí od referenčního zrcadla (Z1). Měřicí optická vlna od měřicího zrcadla (Z2). Po odraze se optické vlny rekombinují na dělicí desce

Diferenční interferometr použitý k prvním testům měření vysokocyklové únavy je schematicky znázorněn na obr. 5.1.2 (vlevo). Diferenční interferometr byl nejprve sestaven z komerčně dostupných optických prvků vlepených v titanové kleci, jak je ukázáno na obr. 5.1.2 (vpravo).

Měří se čtyřmi svazky vůči dvěma odražečům, kterými jsou v tomto případě rovinná zrcadla (Z1, Z2). Měřicí rameno je tvořeno dvěma vnějšími svazky a referenční dvěma vnitřními svazky. Svazky mají společnou osu symetrie a tím je dodržen Abbého princip. Systém je necitlivý vůči malým úhlovým chybám. Koutové hranoly umístěné v obou větvích kompenzují malé úhlové změny vlnoploch, větší úhlové chyby se projeví menším překryvem interferujících svazků a tedy poklesem kontrastu. Vliv náklonu interferometru vůči vzorku se projeví velmi malými kosinovými chybami, které nelze principiálně odstranit. Vertikální náklon nemá vliv, protože jsou všechny svazky v jedné rovině. Horizontální náklon je kompenzován, jelikož se měří v každé větvi dvěma svazky, změna dráhy v jednom svazku je kompenzována opačnou změnou v druhém.



Obr. 5.1.2: Schéma diferenčního interferometru pro měření vysokocyklové únavy vzorku kovů (vlevo). Fotografie první experimentální verze diferenčního interferometru – varianta s vlepenými optickými prvky v titanové kleci (vpravo). Optická vlna se na dělicí rovině polarizačního dělicího hranolu dělí na referenční a měřicí. Referenční optická vlna (ROV) se odráží od referenčního zrcadla (Z1). Měřicí optická vlna (MOV) prochází malým koutovým hranolem a odrazí se od pomocného zrcadla Z. Na dělicí rovině polarizačního hranolu se odráží, dopadá na měřicí zrcadlo (Z2). Po průchodu příslušnými drahami se optické vlny rekombinují a vystupují z optické soustavy do detektoru

5.1.2 Detekční systém s velkou šířkou pásma

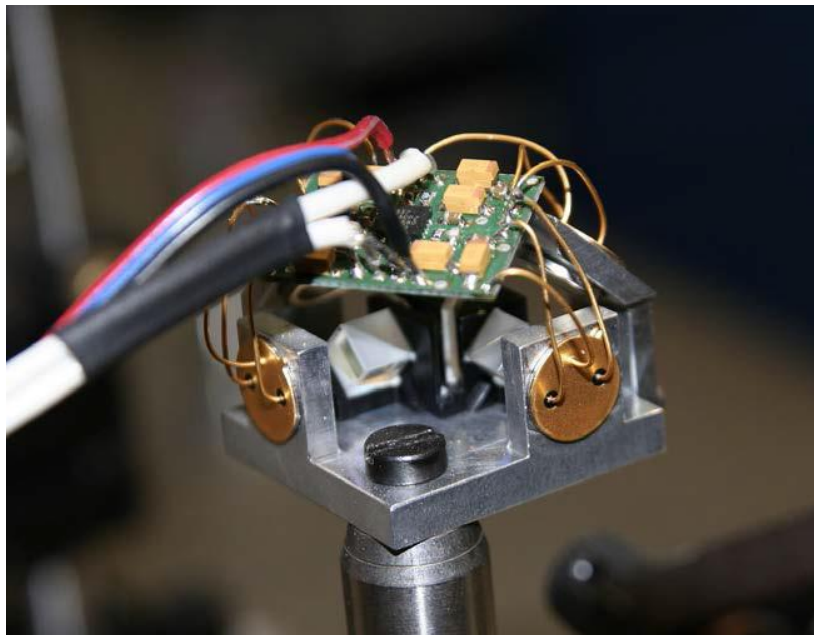
Pro tento typ měření bylo nutné navrhnout a realizovat detekční systém s velkou šířkou pásma až do 10 MHz, aby byla pokryta rychlost pohybu vzorku.

Tato rychlost je na úrovni desítek kHz (ultrazvuk), ale jedná se o rozkmit, který přesahuje několik desítek až stovek násobků vlnové délky viditelného světla. To znamená, že frekvence vlastního interferenčního signálu, navíc v primárním rozlišení (v režimu čítání interferenčních proužků) $\lambda/4$ je na výše zmíněné úrovni.

Jako detekci jsem použila homodynní detekční systém s diferenční konfigurací fotodetektorů a se stejnosměrnou vazbou následných předzesilovačů. Rozšíření šířky frekvenčního pásma bylo dosaženo náležitým návrhem analogového front-endu.

Klíčovým problémem bylo nalézt vhodnou kombinaci poměru mezi kapacitou fotodetektorů, limitující šířku pásma a velikostí jejich aktivního povrchu limitujícího nároky na nastavení celého systému. Výsledná konfigurace splňuje nároky na šířku pásma bez poklesu citlivosti do 10 MHz, s poklesem na $\frac{1}{2}$ hodnoty přenosu (o 3 dB) pak do 50 MHz, průměr aktivní plochy detektoru je 3 mm. Realizovaný vysokofrekvenční experimentální detekční systém je na obr. 5.1.3. S tímto detekčním systémem se podařilo během úvodních experimentů (viz odstavec 5.1.3) ověřit schopnost systému zaznamenávat

reálný průběh deformací vzorků s frekvencí 20 kHz a amplitudou 30 μm v diferenčním režimu.



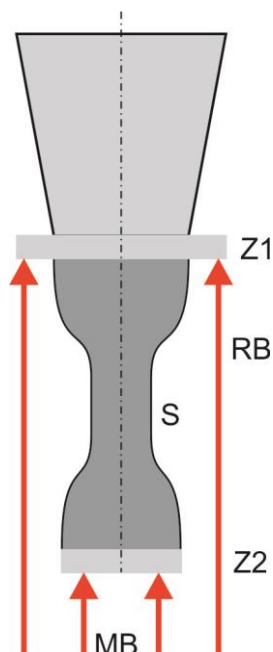
Obr. 5.1.3: Fotografie vysokofrekvenčního experimentálního detekčního systému. Šířka pásma bez poklesu citlivosti do 10 MHz

5.1.3 Experimentální ověření principu diferenčního interferometru s velkou šířkou pásma

Diferenční interferometr v tmelené variantě (viz odstavec 5.1.1) byl použit v prvních měřeních ověřujících funkci interferometru a detekčního systému.

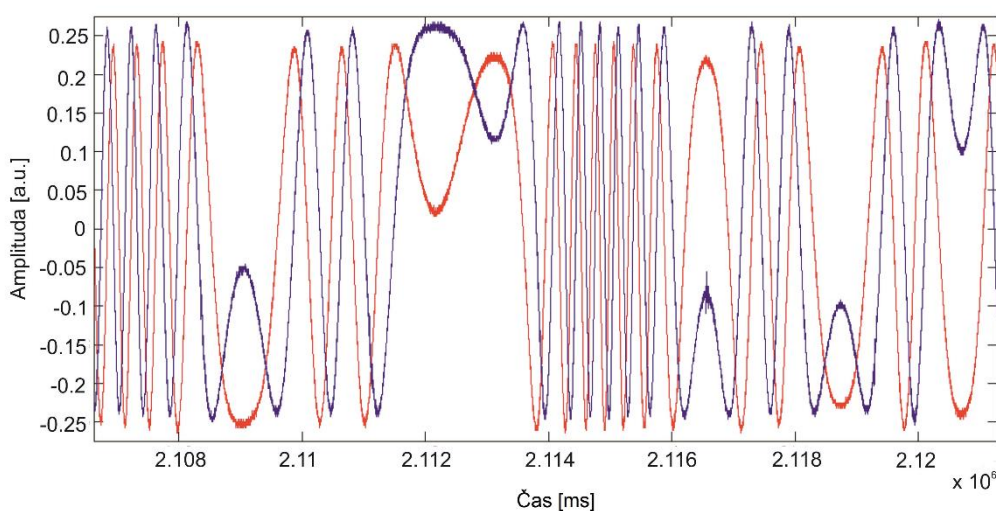
Měření deformace vzorku kovu diferenčním interferometrem probíhá měřením rozdílu délky drah svazků odražených od přední plochy vzorku a od pomocné referenční plochy na opačném konci. Referenční svazky procházejí kolem vzorku, jak je naznačeno na obr. 5.1.4. Aby tento systém fungoval, musí mít referenční a měřicí odrazné plochy optickou kvalitu, tj. úroveň mikrodrsnosti a křivosti povrchu alespoň $\lambda/5$, lépe $\lambda/10$.

Referenční a měřicí odrazné plochy mohou být skleněná zrcadla, která se na testovaný vzorek nalepí. Druhou možností je obrobení kovu na optickou kvalitu (viz odstavec 5.1.4). V prvním experimentu jsem volila lepení zrcadel, protože to představovalo nejsnazší řešení vedoucí k ověření funkčnosti metody. Problémem se ukázala pevnost spoje, pravděpodobně neexistuje lepidlo, které by vydrželo zrychlení vznikající na vzorku. Namáhání vzorku se děje prostřednictvím piezoelektrického měniče a koncentrátoru, kdy je vzorek namáhán rezonančně vůči protizávaží, tvořenému vlastní hmotou.

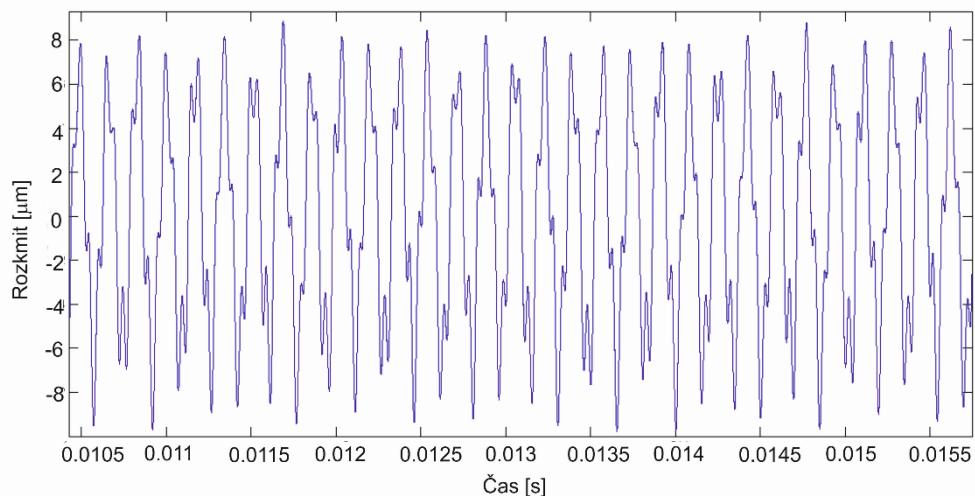


Obr. 5.1.4: Sestava referenčního a koncového zrcadla upevněných na vzorku. Z1: prstencové referenční zrcadlo, Z2: měřicí zrcadlo, RB: referenční svazek, MB: měřicí svazek, S: vzorek

Časové záznamy vibrací jsou uvedeny na obr. 5.1.5 v podobě kvadrurních signálů z obou kanálů při pracovním kmitočtu namáhání 20 kHz a s amplitudou cca 30 μm . Časový záznam na obr. 5.1.6 představuje deformaci vzorku. Je zřetelné, že vibrace vzorku zahrnují více kmitů a jsou důsledkem skládání několika kmitů.



Obr. 5.1.5: Časový záznam výstupních signálů z obou kanálů kvadrurní detekce při pracovním kmitočtu namáhání vzorku 20 kHz a s amplitudou 30 μm



Obr. 5.1.6: Časový záznam deformací vzorku, z něhož je možné vyhodnotit přímo průběh změn délky v závislosti na čase v každém jednotlivém kmitu

5.1.4 Realizace odrazných ploch

V odstavci 5.1.3 bylo popsáno první testovací měření s diferenčním interferometrem, kde měřicí a referenční zrcadlo bylo nalepeno na testovaném vzorku. Z důvodu velkého zrychlení, které vzniká na vzorku, se toto řešení ukázalo jako nevhodné. Po těchto zkušenostech jsou referenční a měřicí plochy kovové a obrobny (vyleštěny) na optickou kvalitu.

Ve spolupráci s partnerským pracovištěm TOPTEC (Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů – Ústav fyziky plazmatu AV ČR) proběhlo leštění odrazných ploch. Požadovaná rovinnost odrazných ploch je na úrovni $\lambda/5 - \lambda/10$ a to jak na úrovni mikrodrsnosti, tak i křivosti povrchu. Zvýšená mikrodrsnost má za následek ztrátu kontrastu interferenčního signálu, křivost vychýlení svazku a v důsledku sklonu vlnoplochy vznik interferenčního obrazce vyššího řádu.

Bylo vytipováno několik druhů kovových materiálů, které byly vyleštěny na optickou kvalitu a proběhlo jejich testování. Jednalo se o nerezovou ocel, dural, hliník a hořčík. Vzorky jsem testovala v sestavě interferometru. Sledovala jsem interferenční signál z homodynního detektoru. Kontrolu rovinnosti jsem provedla na Zygo interferometru Verifire XPZ, který primárně slouží k měření rovinnosti optických ploch. Po důkladné analýze byl jako optimální materiál pro odrazné plochy vybrán speciální typ duralu, který vykazuje lepší odrazivost než nerezová ocel a je zároveň dostatečně lehký. Díky tomu má malou setrvačnou hmotu, což je zásadní při naladění vibrací testovaného vzorku do rezonance.

Tvar referenční a měřicí plochy byl přesně navržen kolegy z ÚFM. Referenční odrazná plocha má průměr 12 mm a je přes závit přišroubovaná k testovanému vzorku. Měřicí odrazná plocha je prstencového tvaru o průměru 28 mm s vnitřním otvorem průměru

5 mm. Tvar vzorku byl navržen na základě analýzy, kterou provedli rovněž kolegové z ÚFM. Testovaný vzorek s referenční a měřicí plochou upevněný v zařízení pro měření vysokocyklové únavy vzorku kovu je na obr. 5.1.7.

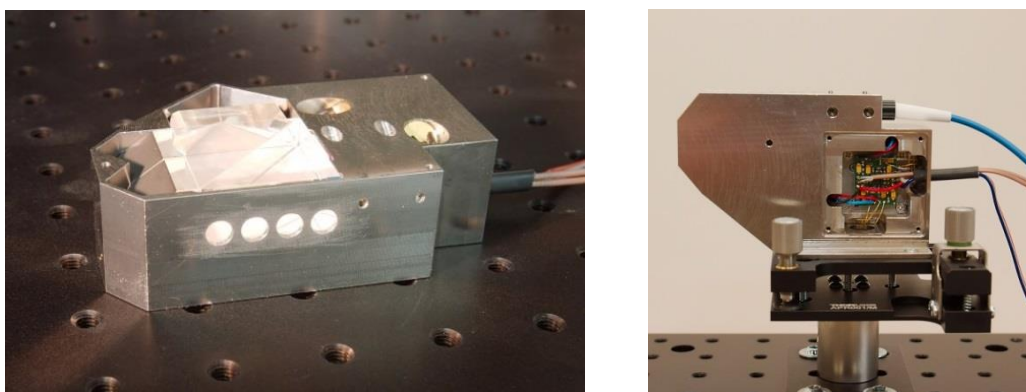


Obr. 5.1.7: Fotografie testovaného vzorku s referenčním a měřicím zrcadlem

5.1.5 Kompaktní diferenční interferometr

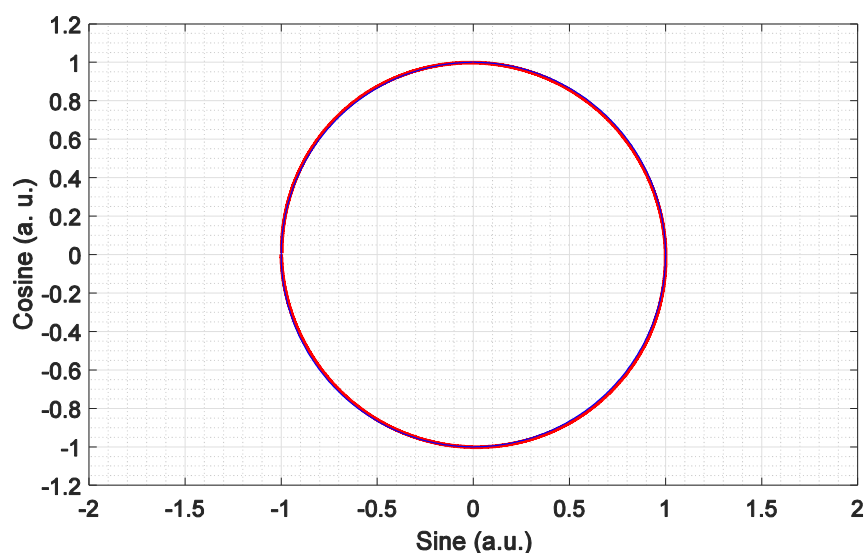
Motivací návrhu diferenční interferometrické sestavy s optickými prvky spojovanými metodou optického kontaktu jsou požadavky na přesnost. Pracuje-li se na nanometrové úrovni, hraje mechanická stabilita a dilatace velkou roli. Principiálně se jedná o totéž uspořádání popsané v odstavci 5.1.1 a schematicky znázorněné na obr. 5.1.2. Optická část diferenčního interferometru je výsledkem společného projektu mezi ÚPT a fy. Meopta (viz Kapitola 4, Odstavec 4.2).

Kompaktní diferenční interferometr se skládá z optické části, detekčního systému a laserového kolimátoru. Všechny tyto prvky jsou umístěny v nerezovém pouzdře o rozměrech 95 mm x 60 mm x 28,5 mm, znázorněno na obr. 5.1.8.



Obr. 5.1.8: Fotografie kompaktního diferenčního interferometru v nerezovém pouzdře

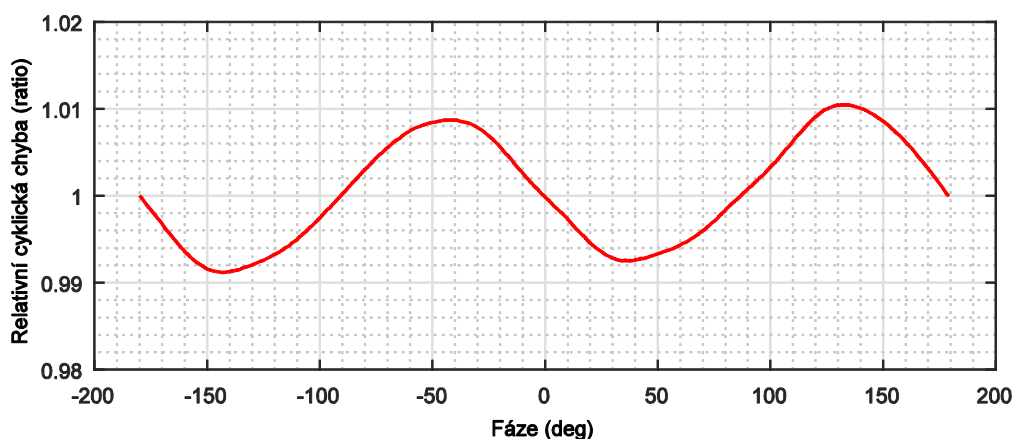
Vzhledem k optické složitosti diferenčního interferometru jsem v první fázi provedla test vyhodnocení linearity interpolace jednoho interferenčního proužku a průběh cyklické chyby. Homodynní systém detekce pracuje s fázovou interpretací interferenčního signálu v rozsahu 0° až 360° a s následným rozbalením fáze. Detekční systém generuje dva signály v kvadratuře. Průběh fáze v rozsahu 0° až 360° je interpretován ve fázové rovině, jako kružnice. Veškeré chyby interferometru se zde projeví v podobě deformace kružnice. Po rozbalení fáze a převodu na měřenou délku se toto následně projeví jako cyklická chyba linearity, periodicky se opakující v každém interferenčním proužku. Záznam jednoho interferenčního proužku ve fázové rovině je na obr. 5.1.9.



Obr. 5.1.9: Vyhodnocení linearity interpolace jednoho interferenčního proužku. Průběh vektoru fáze interferenčního signálu v rozsahu 0° až 360° , zobrazený ve fázové rovině

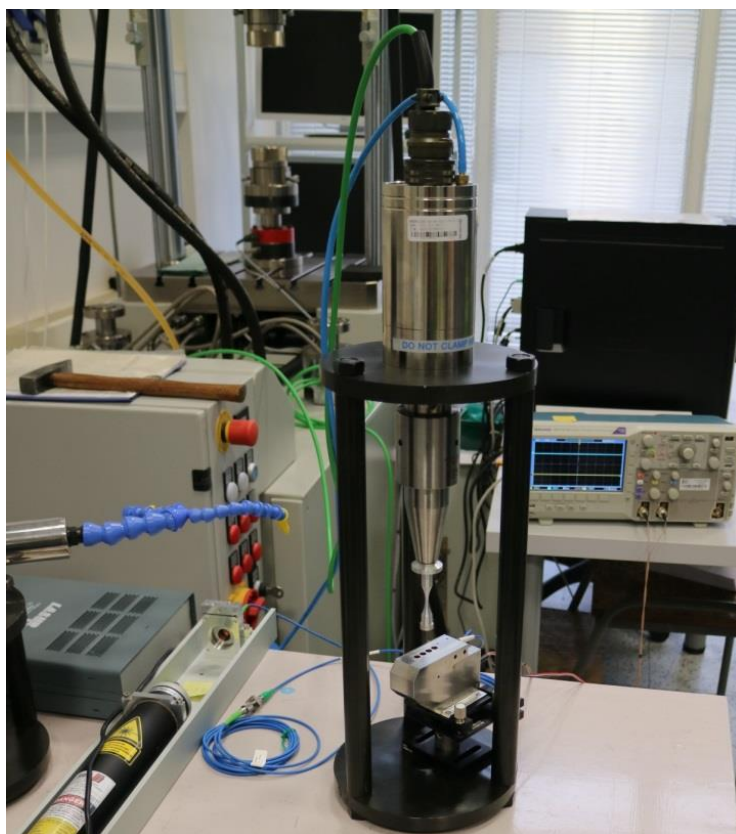
Při průchodu laserového svazku optickou soustavou dochází k nárůstu chyb vlivem deformací vlnoplochy na nehomogenitách optiky a na nerovnostech odrazných ploch.

Dalším problémem jsou změny polarizace na polarizačních prvcích, antireflexních a odrazných optických vrstvách, které se projevují jako fázové chyby. Na obr. 5.1.10 je záznam, který představuje odchylku od kruhovitosti v rozsahu 0° – 360° , z kterého vyplývá velice pozitivní závěr. Chyba linearity (na úrovni cca $\pm 1\%$) má charakter elipticity, jedná se o chybu „pouze“ prvního řádu, což svědčí o vysoké kvalitě optiky a celé realizace.



Obr. 5.1.10: Odchylka od kruhovitosti: chyba linearity interpolace v rozsahu 0° – 360° je na úrovni cca $\pm 1\%$ – chyba prvního řádu

Fotografie kompletního systému pro měření únavy materiálů v režimu vysokocyklové (gigacyklové) únavy je na obr. 5.1.11. Součástí je také rychlá vyhodnocovací karta v obslužném počítači a měřicí software. Systém je zprovozněn v ÚFM a právě probíhají první série měření, které poskytnou nové poznatky týkající se únavy materiálů. Dosažené výsledky budou přínosem jak pro základní poznání mechanismu únavového poškození, tak i pro inženýrskou praxi, která si častěji žádá spolehlivé měření meze únavy v gigacyklové oblasti.



Obr. 5.1.11: Fotografie celého systému pro měření únavové životnosti kovových materiálů v režimu gigacyklové únavy. Systém je provozován na ÚFM

KAPITOLA 6

6 SHRNUTÍ

Disertační práce se týká interferometrických délkových měření orientovaných především na víceosé souřadnicové měřicí systémy.

Cílem disertační práce byl návrh, realizace a vyhodnocení funkce interferometrických měřicích sestav pro různé měřicí konfigurace a aplikace. V práci jsem se věnovala problematice popisu, měření a kompenzace vlivu indexu lomu vzduchu a následnému vyhodnocení interferenčního signálu.

Kompenzaci vlivu indexu lomu vzduchu okolního prostředí jsem zkoumala na experimentální úrovni. Navrhla a ověřila jsem unikátní koncept interferometru se stojatou vlnou vybuzenou v dutině Fabryova-Perotova rezonátoru, založený na principu stabilizace vlnové délky. Stěžejním problémem byla realizace transparentního fotodetektoru, který umožňuje detekovat maxima a minima stojaté vlny uvnitř dutiny rezonátoru. Díky tomu lze takovéto uspořádání použít k odměřování délky. Funkčnost principu odměřování ve stojaté vlně se stabilizací vzduchové vlnové délky se mi podařilo prokázat.

Dále jsem se zaměřila na studium rychlých změn indexu lomu vzduchu. Za tímto účelem jsem uspořádala experimentální sestavy kombinující interferometr s refraktometrem. Interpretovala jsem fluktuace indexu lomu vzduchu prostřednictvím teorie náhodných dějů v elementárních vzduchových objemech a ověřila jsem tuto teorii v praktických podmínkách laboratorních interferometrických měření. Z výsledků vyplývá, že pokud je délka měřicího ramene interferometru kratší, než určitá kritická délka (v daném případě cca 50 mm), fluktuace indexu lomu vzduchu jsou v běžném prostředí velice malé a lze je zanedbat. To svědčí o správnosti navržené interpretace. Podobně to platí i v případě dvou rovnoběžných, blízkých měřicích svazků. Pokud je rozteč svazků do několika málo desítek mm, fluktuace indexu lomu vzduchu vykazují vysokou míru korelace. Na základě těchto poznatků a výsledků jsem navrhla a realizovala nová uspořádání interferometrů pro odměřování kombinující délkovou interferometrii a tracking refraktometr pro on-line kompenzaci fluktuací indexu lomu vzduchu s blízkými svazky. Tyto návrhy představují v interferometrii a metrologii zcela nový koncept, který může nalézt uplatnění v souřadnicových odměřovacích systémech pro nanometrologii a nabízí významné snížení nejistoty měření způsobené nestabilitou indexu lomu prostředí.

Dále jsem se věnovala návrhům, realizacím a vyhodnocením funkce interferometrických měřicích sestav v různých konfiguracích. Jednotlivé návrhy vyplývaly z požadavků průmyslových partnerů v rámci společných výzkumných projektů.

Sestavila jsem první prototypy optického kalibračního snímače, který nalezne uplatnění v přesném strojírenství – např. automobilovém průmyslu – jako náhrada za současné indukčnostní a kapacitní snímače délky. Jeho zásadní předností je metrologická návaznost měření na základní etalon délky metru.

Na základě mého návrhu a výkresové dokumentace vznikly ve spolupráci s průmyslovým partnerem prototypy interferometrických jednotek, které jsou zhotoveny s vysokou přesností a sesávané metodou optického kontaktu. Tyto interferometrické jednotky jsou součástí modulárního interferometrického odměřovacího systému, který může být použit pro různé varianty odměřování (jednoosé, souřadnicové, diferenční). Součástí systému je laserový zdroj, detekční systém, potřebná elektronika a počítač s vyhodnocovacím softwarem. Tento systém by mohl nalézt uplatnění jak ve výzkumné oblasti, tak i v průmyslové praxi. Diferenční verze interferometru již například nalezla uplatnění při měření vysokocyklové únavy vzorků kovů a interferometrická jednotka pro souřadnicové odměřování byla použita v národním etalonu pro nanometrologii. Posledním realizovaným interferometrem byl diferenční interferometr pro odměřování polohy stolku elektronového litografu, který pracuje na infračervené vlnové délce. Tento diferenční interferometr využívá zcela novou detekční metodu, která je založena na vysokofrekvenční modulaci optické frekvence laseru pro získání komplementárních signálů kvadrurního fázového rozkladu.

6.1 HLAVNÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

- Výsledky související s problematikou kompenzace fluktuací indexu lomu vzduchu při interferometrickém odměřování jsem prezentovala na mezinárodních konferencích a publikovala v impaktovaných odborných časopisech.

HOLA, M., HRABINA, J., SARBORT, M., OULEHLA, J., CIP, O., LAZAR, J. Contribution of the Refractive Index Fluctuations to the Length Noise in Displacement Interferometry. *Measurement Science Review* 2015, 15, (5), 263–267.

HOLA, M., CIP, O., SARBORT, M., LAZAR, J. Air flow and length noise in displacement interferometry. In *Optics and Measurement Conference 2014*, Kovacicinova, J.; Vit, T., Eds. 2015; Vol. 9442.

HOLA, M., HRABINA, J., CIP, O., FEJFAR, A., STUCHLIK, J., KOCKA, J., OULEHLA, J., LAZAR, J. Nanopositioning with detection of a standing wave. *Nanocon 2013, 5th International Conference* 2014, 792–796.

HOLA, M., LAZAR, J., CIP, O., BUCHTA, Z. In-beam tracking refractometry for coordinate interferometric measurement. In *Optical Micro- and Nanometrology V*, Gorecki, C.; Asundi, A. K.; Osten, W., Eds. 2014; Vol. 9132.

HOLA, M., BUCHTA, Z., CIP, O., LAZAR, J. Position sensing with suppression of the drift of the refractive index of air for high resolution interferometry. *2014 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS) 2014*.

HOLA, M., CIP, O., HRABINA, J., BUCHTA, Z., LAZAR, J. Differential interferometry with suppression of the influence refractive index of air for nanometrology. *Nanocon 2012, 4th International Conference 2012*, 805–810.

- Výsledky související s realizací interferometrických odměřovacích systémů.

Pokročilé interferometrické systémy pro měření v nanotechnologiích.

Základní sestava interferometru – funkční vzorek.

Platforma pokročilých mikroskopických a spektroskopických technik pro nano a mikrotechnologie.

HOLA, M., LAZAR, J., CIZEK, M., HUCL, V., RERUCHA, S., CIP, O. Coordinate interferometric system for measuring the position of a sample with infrared telecom laser diode. In *Optics and Measurement International Conference 2016*, Kovacicinova, J., Ed. 2016; Vol. 10151.

Další publikační výstupy, kterých jsem spoluautorkou, jsou uvedeny v příloze 1.

Použitá literatura

- [1] QUINN, T. J. Practical realization of the definition of the metre (1997). *Metrologia* 1999, 36, 211–244.
- [2] LAZAR, J., CIP, O., CIZEK, M., HRABINA, J., BUCHTA, Z. Suppression of Air Refractive Index Variations in High-Resolution Interferometry. *Sensors-Basel* 2011, 11, (8), 7644–7655.
- [3] HRABINA, J., SARBORT, M., ACEF, O., DU BURCK, F., CHIODO, N., CIP, O., LAZAR, J. Optical Frequency References for Laser Interferometry. *Optics and Measurement Conference 2014* 2015, 9442.
- [4] CIP, O. PETRU, F. A scale-linearization method for precise laser interferometry. *Measurement Science and Technology* 2000, 11, (2), 133–141.
- [5] PETRU, F. VESELA, Z. Single-Frequency Hene Laser with a Central Maximum of Output Power. *Optics Communications* 1993, 96, (4–6), 339–347.
- [6] LAZAR, J., HRABINA, J., JEDLICKA, P., CIP, O. Absolute frequency shifts of iodine cells for laser stabilization. *Metrologia* 2009, 46, (5), 450–456.
- [7] RERUCHA, S., YACOOT, A., PHAM, T. M., CIZEK, M., HUCL, V., LAZAR, J., CIP, O. Laser source for dimensional metrology: investigation of an iodine stabilized system based on narrow linewidth 633 nm DBR diode. *Measurement Science and Technology* 2017, 28, (4).
- [8] RERUCHA, S. *Advanced Digital Methods for precise Measurement of Length*. Brno, 2012, 116 s. Disertační práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky.
- [9] SALAMI, H. ROSS, A. J. A molecular iodine atlas in ascii format. *Journal of Molecular Spectroscopy* 2005, 233, (1), 157–159.
- [10] QUINN, T. J. Editorial on the occasion of Metrologia's 1000th article. *Metrologia* 1999, 36, (2), 77–78.
- [11] DORINGSHOFF, K., REGGENTIN, M., KOVALCHUK, E. V., NAGEL, M., KEETMAN, A., SCHULDT, T., BRAXMAIER, C., PETERS, A. Iodine based optical frequency reference with 10(–15) stability. *2012 European Frequency and Time Forum (Eftf)* 2012, 419–421.
- [12] GOODWIN E., P., WYANT, J., C. *Field Guide to Interferometric Optical Testing*. SPIE – The Internationale Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington USA, SPIE Order No. FG 10, 2004, 100 p., ISBN 0–8194–6510–0.
- [13] ELLIS, J., D. *Field Guide of Displacement Measuring Interferometry*. SPIE Press Bellingham, Washington USA, SPIE Order No. FG 30, 2014. 134 p. ISBN 978–0–8194–9799–4.

- [14] TOPCU, S., CHASSAGNE, L., HADDAD, D., ALAYLI, Y. JUNCAR, P. Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometric scale. *Review of Scientific Instruments* 2003, 74, (11), 4876–4880.
- [15] RERUCHA, S., BUCHTA, Z., SARBORT, M., LAZAR, J., CIP, O. Detection of Interference Phase by Digital Computation of Quadrature Signals in Homodyne Laser Interferometry. *Sensors-Basel* 2012, 12, (10), 14095–14112.
- [16] MAJUMDAR K. Arun. *Advance Free Space Optics (FSO): A Systems Approach*. Springer Series in Optical Sciences 186, 2015, 389 p. ISBN 978–1–4939–0918–6.
- [17] WILFERT, O. Optické bezkabelové spoje. Brno, 2004. 84s., 8 s. příloh. Habilitační práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Ústavu radioelektroniky.
- [18] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: *Spie Press*, 2001.
- [19] WILFERT, O. Fotonika a optické komunikace, Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [20] PETRU, F. CIP, O. Problems regarding linearity of data of a laser interferometer with a single-frequency laser. *Precision Engineering-Journal of the American Society for Precision Engineering* 1999, 23, (1), 39–50.
- [21] EGAN, P. STONE, J. A. Absolute refractometry of dry gas to ± 3 parts in 10^9 . *Applied Optics* 2011, 50, (19), 3076–3086.
- [22] EGAN, P. F., STONE, J. A., HENDRICKS, J. H., RICKER, J. E., SCACE, G. E., STROUSE, G. F. Performance of a dual Fabry-Perot cavity refractometer. *Optics Letters* 2015, 40, (17), 3945–3948.
- [23] CIP, O., PETRU, F., MATOUSEK, V., BUCHTA, Z., LAZAR, J. Direct measurement of index of refraction of air by means of high-resolution laser interferometry. *Physica Scripta* 2005, T118, 48–50.
- [24] ZHANG, J., LU, Z. H. WANG, L. J. Precision measurement of the refractive index of air with frequency combs. *Optics Letters* 2005, 30, (24), 3314–3316.
- [25] ZHANG, J., LU, Z. H., MENEGOZZI, B., WANG, L. J. et al. Application of frequency combs in the measurement of the refractive index of air. *Review of Scientific Instruments* 2006, 77, (8).
- [26] EDLEN, B. The Dispersion of Standard Air. *Journal of the Optical Society of America* 1953, 43, (5), 339–344.
- [27] CIDDOR, P. E. Refractive index of air: New equations for the visible and near infrared. *Applied Optics* 1996, 35, (9), 1566–1573.
- [28] CIDDOR, P. E. Refractive index of air: 3. The roles of CO₂ H₂O, and refractivity virials. *Applied Optics* 2002, 41, (12), 2292–2298.
- [29] BIRCH, K. P., REINBOTH, F., WARD, R. E., et al. The Effect of Variations in the Refractive-Index of Industrial Air Upon the Uncertainty of Precision Length Measurement. *Metrologia* 1993, 30, (1), 7–14.

- [30] BUCHTA, Z., SARBORT, M., CIZEK, M., Hucl, V., RERUCHA, S., PIKALEK, CIP, O. Automatic system for gauge block calibration optimized to meet legal length metrology requirements. *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics* 2016, 10142.
- [31] CIP, O., MIKEL, B., CIZEK, M., SMID, R., BUCHTA, Z., LAZAR, J. Laser Interference Nano-Comparator for Length Sensor Calibration in Nanometric Scale. *Nanocon 2010, 2nd International Conference* 2010, 274–277.
- [32] MELI, F. THALMANN, R. Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements. *Measurement Science and Technology* 1998, 9, (7), 1087–1092.
- [33] KORPELAINEN, V., SEPPA, J. LASSILA, A. Design and characterization of MIKES metrological atomic force microscope. *Precision Engineering* 2010, 34, (4), 735–744.
- [34] DAI, G. L., POHLENZ, F., XU, M., KOENDERS, L., DANZEBRINK, H. U., WILKENING, G. Accurate and traceable measurement of nano- and microstructures. *Measurement Science and Technology* 2006, 17, (3), 545–552.
- [35] HOLA, M. *Interferometrie s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu – experimentální ověření principu*. Olomouc, 2010. 44 s. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra optiky a laboratoř kvantové optiky. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Josef Lazar, Dr.
- [36] HOLA, M. *Interferometrie délky se stojatou vlnou*. Olomouc, 2012. 79 s. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Josef Lazar, Dr.
- [37] LAZAR, J., HOLA, M., CIP, O., CIZEK, M., HRABINA, J., BUCHTA, Z. Refractive Index Compensation in Over-Determined Interferometric Systems. *Sensors-Basel* 2012, 12, (10), 14084–14094.
- [38] LAZAR, J., HOLA, M., CIP, O., CIZEK, M., HRABINA, J., BUCHTA, Z. Displacement interferometry with stabilization of wavelength in air. *Optics Express* 2012, 20, (25), 27830–27837.
- [39] SCHOTT AG. *Katalog Zerodur – Zero Expansion Glass Ceramic*. Mainz: Schott AG, 2011.
- [40] LAZAR, J. *Interferometrie pro nanometrologii*. Brno 2012. 28 s. Teze habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky.
- [41] JAGER, G., MANSKE, E., HAUSOTTE, T., BUCHNER, H. J. Nano Measuring Machine for zero Abbe offset coordinate-measuring. *Technisches Messen* 2000, 67, (7–8), 319–323.
- [42] BLACK, E. D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization. *American Journal of Physics* 2001, 69, (1), 79–87.

- [43] HOLA, M., HRABINA, J., CIP, O., FEJFAR, A., STUCHLIK, J., KOCKA, J., OULEHLA, J., LAZAR, J. Nanopositioning with Detection of a Standing Wave. *Nanocon 2013, 5th International Conference* 2014, 792–796.
- [44] HOLA, M., LAZAR, J., CIP, O., BUCHTA, Z. In-beam tracking refractometry for coordinate interferometric measurement. *Optical Micro- and Nanometrology V* 2014, 9132.
- [45] HRABINA, J., LAZAR, J., HOLA, M., CIP, O. Frequency Noise Properties of Lasers for Interferometry in Nanometrology. *Sensors* 2013, 13, 2206–2219.
- [46] LANCE, A. L., SEAL, W. D., LABAAR, F. Phase noise measurement systems. *ISA Transactions* 1982, 21, 37–44.
- [47] HUCL, V., CIZEK, M., HRABINA, J., et al. Automatic unit for measuring refractive index of air based on Ciddor equation and its verification using direct interferometric measurement method. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection Viii* 2013, 8788.
- [48] JAN, J. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů. (2. upravené a rozšířené vydání)* Brno: VITIUM, 2002. 427 s. ISBN 80–214–1558–4
- [49] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *FR-TI2/705 – Bezkontaktní optické měřicí metody a systémy pro přesné strojírenství (2010-2014, MPO/FR)* [online databáze]. Dostupné z: <https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=FR-TI2%2F705>. Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací.
- [50] SMITH, W., J. *Modern Optical Engineering, Fourth Edition*. SPIE Press, 768 p., ISBN 9780819470966.
- [51] CIZEK, M., BUCHTA, Z., MIKEL, B., LAZAR, J., CIP, O. Interferometric nanocomparator for calibrating precision displacement sensors. *Interferometry Xv: Applications* 2010, 7791.
- [52] RERUCHA, S., HOLA, M., SARBORT, M., OULEHLA, J., MIKEL, B., LAZAR, J., CIP, O. Compact interferometric displacement gauge subnanometer resolution and millimeter range. *2016 IEEE Sensors*, ISBN 978–1–4–4799–8287–5.
- [53] Technologická agentura ČR. *RIV/68081731:_/13:00421265 – Pokročilé interferometrické systémy pro měření v nanotechnologiích (2013)* [online databáze]. Praha. Dostupné z: http://www.isvav.cz/resultDetail.do;jsessionid=A9CFDD23AB0A5D2D8FC7E34BED41339E?rowId=RIV%2F68081731%3A_____%2F13%3A00421265!RIV14-TA0-68081731. Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací.
- [54] FANDERLÍK, I. A KOL. *Křemenné sklo a jeho využití v praxi*, Praha, SNTL, 1985, 279 s.
- [55] HRABINA, J., SARBORT, M., ACEF, O., DU BURCK, F., CHIODO, N., HOLA, M., CIP, O., LAZAR, J. Spectral properties of molecular iodine in absorption cells filled to specified saturation pressure. *Applied Optics* 2014, 53, (31), 7435–7441.

- [56] Technologická agentura ČR. *Platforma pokročilých mikroskopických a spektroskopických technik pro nano a mikrotechnologie (2012–2019, TAO/TE)* [online databáze]. Praha. Dostupné z: <http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=TE01020233>. Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací.
- [57] DOWNS, M., J., NUNN, J., W. Verification of the sub-nanometric capability of an NPL differential plane mirror interferometer with a capacitance probe. *Measurement Science and Technology* 1998, 9, (9), 1437–1440.

Seznam obrázků

Obr. 2.1.1:	Schematické znázornění základních částí laserového interferometru ovlivňujících výslednou nejistotu měření	14
Obr. 2.1.2:	Schéma Michelsonova interferometru s koutovými hranoly eliminujícími úhlové odchylky	16
Obr. 3.1.1:	Principiální schéma pasivního Fabryova-Perotova rezonátoru s transparentním fotodetektorem (TFD)	23
Obr. 3.1.2:	Schéma transparentního fotodetektoru (vlevo). Detailní fotografie transparentního fotodetektoru (vpravo)	24
Obr. 3.1.3:	Schéma experimentálního uspořádání pasivního F-P rezonátoru s transparentním fotodetektorem (TFD)	25
Obr. 3.1.4:	Fotografie experimentálního uspořádání pasivního F-P rezonátoru s vloženým transparentním fotodetektorem	26
Obr. 3.1.5:	Schéma řízení délky rezonátoru. Řízení délky rezonátoru je založeno na modulaci délky rezonátoru a synchronní detekci	27
Obr. 3.1.6:	Časový záznam detekované stojaté vlny transparentním fotodetektorem (TFD) při pohybu podél osy laserového svazku v pasivním F-P rezonátoru	27
Obr. 3.1.7:	Časový záznam výstupní optické vlny z F-P rezonátoru detekované detektorem (D)	28
Obr. 3.1.8:	Časový záznam regulační veličiny laserového zdroje – zatížen pouze šumem elektroniky	28
Obr. 3.2.1:	Schéma experimentální sestavy pro detekci rychlých změn indexu lomu vzduchu.	31
Obr. 3.2.2:	Fotografie části experimentální sestavy protiběžného interferometru, kde je jedna z evakuovaných kyvet	32
Obr. 3.2.3:	Časový záznam délkového šumu s délkou ramene 10 mm	33
Obr. 3.2.4:	Časový záznam délkového šumu s délkou ramene 80 mm	34
Obr. 3.2.5:	Hodnoty RMS délkového šumu v závislosti na změně délky měřicího ramene	34

Obr. 3.2.6:	Schéma experimentální sestavy pro měření úrovně nejistoty interferometrického měření při vzájemném posunutí měřicích svazků	36
Obr. 3.2.7:	Časové záznamy změny optické délky v závislosti na laterálním posunu měřicích svazků protiběžného interferometru	37
Obr. 3.2.8:	Korelační koeficient – shoda měřicích ramen interferometru v závislosti na změně vzájemné vzdálenosti	38
Obr. 3.3.1:	Schematické znázornění interferometru pro měření odrazem od vnitřní strany vzorku	39
Obr. 3.3.2:	Schematické znázornění interferometru pro měření odrazem z vnější strany vzorku	39
Obr. 3.3.3:	Schéma sestavy interferometru určené pro měření z vnitřní strany	41
Obr. 3.3.4:	Fotografie optické sestavy interferometru pro odměřování z vnitřní strany	42
Obr. 3.3.5:	Fotografie sestavy interferometru pro odměřování z vnitřní strany vzorku (vlevo), detailní fotografie s jednotlivými optickými prvky vlepenými v titanové kleci (vpravo)	43
Obr. 3.3.6:	Schéma průchodu optické vlny čtyřprůchodovou interferometrickou jednotkou (vlevo). Fotografie interferometru – jednotlivé optické prvky vlepeny v titanové kleci (vpravo)	44
Obr. 3.3.7:	Schéma speciálně navrstveného dělicího hranolu s naznačeným průchodem laserového svazku	45
Obr. 3.3.8:	Schéma sestavy interferometru určené pro měření z vnější strany vzorku	45
Obr. 3.3.9:	Foto experimentální sestavy interferometru pro odměřování z vnější strany	46
Obr. 3.3.10:	Časový záznam změny optické délky interferometru umístěného v uzavřeném boxu	47
Obr. 3.3.11:	Časový záznam změny optické délky interferometru umístěného volně na optickém stole	48
Obr. 4.1.1:	Principiální schéma optického kalibračního snímače: a) optická sestava interferometru, b) laserový zdroj, c) detekční část	51
Obr. 4.1.2:	Fotografie znázorňující postupný vývoj optického kalibračního snímače	54
Obr. 4.1.3:	Záznam měření přesnosti kalibračního optického snímače	54

Obr. 4.2.1:	Optická konfigurace interferometru pro měření v jedné ose. Fotografie optický prvků – vlevo, principiální schéma optické sestavy – vpravo	57
Obr. 4.2.2:	Optická konfigurace interferometru určená pro měření odrazem od rovinného zrcadla. Fotografie optické sestavy – vlevo, principiální schéma optické sestavy – vpravo	57
Obr. 4.2.3:	Optická konfigurace diferenčního interferometru pro měření odrazem od rovinných zrcadel. Fotografie optické sestavy – vlevo, principiální schéma optické sestavy – vpravo	58
Obr. 4.2.4:	Přehledové schéma modulární interferometrické sestavy	59
Obr. 4.2.5:	Fotografie kompaktní interferometrické jednotky pro měření odrazem od rovinného zrcadla. Kompaktní jednotka obsahuje: optickou část, detekční jednotku a prostor pro laserový kolimátor	60
Obr. 4.2.6:	Fotografie kompletního interferometrického systému pro souřadnicové (2D) odměřování s interferometrickými jednotkami, laserovým zdrojem, vláknovými komponenty a elektronikou	62
Obr. 4.2.7:	Fotografie umístění kompaktních interferometrických jednotek v systému šestiosého odměřování pro nanometrologii	63
Obr. 4.2.8:	Geometrická konfigurace šestiosého odměřování polohy stolku v nanometrologickém etalonu (6 samostatných měřících bodů/interferometrů)	64
Obr. 4.2.9:	Fotografie výsledného AFM mikroskopu s interferometrickým odměřováním polohy stolku pro nanometrologii. Systém je provozován v ČMI	64
Obr. 4.3.1:	Schematické uspořádání dvou interferometrických jednotek pro diferenční měření v jedné ose obrazem od rovinných zrcadel.	66
Obr. 4.3.2:	Časový záznam dlouhodobé stability komory litografu při vyčerpání.	67
Obr. 4.3.3:	Časový záznam představující signály I_x , I_y z homodynní detekce.	67
Obr. 4.3.4:	Schéma optického uspořádání interferometru pro diferenční měření v jedné ose odrazem od rovinných zrcadel umístěných nad sebou.	68
Obr. 4.3.5:	Fotografie uspořádání jedné osy optické sestavy interferometru pro diferenční měření – ověření funkce	69
Obr. 4.3.6:	Fotografie testovací sestavy interferometru pro měření v jedné ose s koutovými odražeči, vysokofrekvenčním fotodetektorem a předzesilovačem	71

Obr. 4.3.7:	Schematicky znázorněna nízkofrekvenční a vysokofrekvenční složka intenzity interferenčního signálu snímaná fotodetektorem.	72
Obr. 4.3.8:	Blokové schéma detekčního řetězce. Signál Y je získáván prostým měřením intenzity interference a odfiltrováním vysokofrekvenční složky	73
Obr. 4.3.9:	Blokové schéma algoritmu – adaptivní řízení zisku v analogové detekční části řetězce detekce interferenčních proužků	74
Obr. 4.3.10:	Uživatelské rozhraní pro grafické znázornění interferenčních signálů v reálném čase. Vývojové prostředí LabView	75
Obr. 4.3.11:	Fotografie příruby vakuové komory s optomechanikou interferometru pro diferenční měření v jedné ose	76
Obr. 4.3.12:	Komora litografu s polohovacím souřadnicovým stolem a interferometry instalovanými do stěn komory	77
Obr. 4.3.13:	Záznam najíždění stolku litografu do pozice X0. Data poskytnuta spoluřešitelem projektu firmou Tescan	78
Obr. 5.1.1:	Schéma Jaminova interferometru používaného pro diferenční měření	80
Obr. 5.1.2:	Schéma diferenčního interferometru pro měření vysokocyklové únavy vzorku kovů (vlevo). Fotografie první experimentální verze diferenčního interferometru – varianta s vlepenými optickými prvky v titanové kleci (vpravo)	81
Obr. 5.1.3:	Fotografie vysokofrekvenčního experimentálního detekčního systému. Šířka pásma bez poklesu citlivosti do 10 MHz	82
Obr. 5.1.4:	Sestava referenčního a koncového zrcadla upevněných na vzorku	83
Obr. 5.1.5:	Časový záznam výstupních signálů z obou kanálů kvadrurní detekce při pracovním kmitočtu namáhání vzorku 20 kHz a s amplitudou 30 μm	83
Obr. 5.1.6:	Časový záznam deformací vzorku, z něhož je možné vyhodnotit přímo průběh změn délky v závislosti na čase v každém jednotlivém kmitu	84
Obr. 5.1.7:	Fotografie testovaného vzorku s referenčním a měřicím zrcadlem	85
Obr. 5.1.8:	Fotografie kompaktního diferenčního interferometru v nerezovém pouzdře	86
Obr. 5.1.9:	Vyhodnocení linearity interpolace jednoho interferenčního proužku	86
Obr. 5.1.10:	Odchylka od kruhovitosti: chyba linearity interpolace v rozsahu 0° – 360° je na úrovni cca $\pm 1\%$ – chyba prvního řádu	87

Obr. 5.1.11: Fotografie celého systému pro měření únavové životnosti kovových materiálů v režimu gigacyklové únavy. Systém je provozován na ÚFM

88

Seznam tabulek

Tab. 3.2.1:	Hodnoty korelačního koeficientu a směrodatné odchylky v závislosti na vzálenosti měřicích svazků	38
Tab. 3.3.1:	Porovnání výsledků měření v uzavřeném a otevřeném boxu	49

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky	Význam
<i>A</i>	Zesilovač
<i>A/D</i>	Analogově/digitální převodník
<i>AFM</i>	Mikroskop atomárních sil
<i>AMC</i>	Výpočet amplitudy
<i>AR</i>	Antireflexní vrstva
<i>AVG</i>	Zprůměrování
<i>B</i>	Mechanická reference
<i>BIPM</i>	Bureau international des poids et mesures
<i>C</i>	Clona
<i>CAN</i>	Controller Area Network
<i>CGPM</i>	Conférence Générale des Poids et Mesures
<i>CNTR</i>	Výpočet posunutí
<i>CO₂</i>	Oxid uhličitý
<i>COM</i>	Komunikace
<i>COMP</i>	Algoritmus lineární korekce
<i>ČMI</i>	Český metrologický institut
<i>D, D1, D2</i>	Detektor
<i>DAQ</i>	Digitálně-analogový převodník
<i>DFB</i>	Distributed Feedback Laser
<i>DBR</i>	Distributed Bragg Reflector Laser
<i>DDS</i>	Deska přímé digitální syntézy

DEM0D	Synchronní demodulace
<i>DI</i>	Karta digitalizace a zpracování interferenčního signálu
<i>DIF</i>	Diferenční interferometrická jednotka
<i>DJ</i>	Homodyní detekční jednotka
<i>DSP</i>	Signálový procesor
<i>E</i>	Titanové elektrody
<i>EK, EK1, EK2</i>	Evakuovaná kyveta
<i>EL</i>	Skříň s elektronikou
<i>ELG</i>	Electron beam pattern generator
<i>ES</i>	Elektrické spojení
<i>FI</i>	Faradayův izolátor
F-P rezonátor	Fabryův-Perotův rezonátor
<i>FS</i>	Vláknový dělič
FZÚ	Fyzikálního ústavu AV ČR, v.v.i.
<i>GEN</i>	Generátor
He-Ne laser	Helium-Neonový laser
<i>HV AMP</i>	Vysokonapěťový zesilovač + proporcionálně-integrační regulátor
<i>In, In1, In2</i>	Vstup
<i>INT</i>	Jednotka interferometru
<i>IR</i>	Infračervené spektrum
<i>KO, KO1, KO2, KO3</i>	Koutový hranol
<i>L</i>	Celkový měřicí rozsah
<i>L_a, L_b</i>	Měřená vzdálenost
<i>LK, LK1, LK2</i>	Laserový kolimátor
<i>LOCK-IN</i>	Synchronní detektor
<i>L_{out}</i>	Rozdíl vzdáleností na výstupu interferometru

<i>Lr</i>	Celková délka rezonátoru
<i>LS</i>	Laserový svazek
<i>LZ</i>	Laserový zdroj
<i>M</i>	Odrazná plocha
<i>MB</i>	Měřicí svazek
MIX	Směšování
<i>MOV</i>	Měřicí optická vlna
<i>MPS</i>	Měřicí plocha – stolek
<i>MV</i>	Měřený vzorek
<i>MZ</i>	Měřicí zrcadlo
<i>NBS</i>	Nepolarizační dělicí hranol
<i>O</i>	Optické vlákno
<i>OC</i>	Optický cirkulátor
<i>Out, OutLa, OutLb, OutL</i>	Výstup
<i>P</i>	Fotodetektor
<i>PC</i>	Počítač
<i>PD, PD1, PD2, PD3</i>	Polarizační dělicí hranol
PHASE	Fáze
<i>PI</i>	Fotodetektor interferenčního signálu
<i>PI</i> regulátor	Proporcionálně-integrační regulátor
<i>PM</i>	Polarization maintaining
<i>PS</i>	Stolek s piezoposuvem
<i>PS1, PS2</i>	Posuvný stolek
<i>PZT</i>	Piezoelektrický měnič
<i>RB</i>	Referenční svazek
<i>RI</i>	Jednotka vyhodnocení indexu lomu

<i>RMS</i>	Root mean square
<i>ROV</i>	Referenční optická vlna
<i>RPT</i>	Referenční plocha – tryska
<i>RZ</i>	Referenční zrcadlo
<i>S</i>	Substrát/vzorek
<i>SH</i>	Speciální hranol
<i>Si</i>	Křemíková vrstva
<i>SO</i>	Sférický odražeč
<i>SP</i>	Snímač parametrů atmosféry
<i>ST</i>	Karta stabilizace laseru
<i>SW</i>	Software
<i>TB</i>	Termostatizační box
<i>TFD</i>	Transparentní fotodetektor
ÚFM	Ústav fyziky materiálů AVČR, v.v.i.
ÚPT	Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i.
UREL	Ústav radioelektroniky
<i>UZ</i>	Úhlové zrcadlo
<i>VF</i> šum	Vysokofrekvenční šum
<i>VGA</i>	Zesilovač s řízením zisku
<i>VN</i> zesilovač	Vysokonapěťový zesilovač
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické
<i>W</i>	Elektrické kontakty
<i>Z1, Z1', Z2, Z2'</i>	Zrcadlo
<i>ZD</i>	Napájecí zdroj
<i>ΔL, ΔL_a, ΔL_b</i>	Změna měřené vzdálenosti
<i>λ/2, λ/2', λ/2'', λ/2'''</i>	Půlvlnná destička

$\lambda/4, \lambda/4', \lambda/4''$

Čtvrtvlnná destička

Symbol	Význam	Jednotka
λ	Vlnová délka	[nm]
A, B	Body v prostoru	[-]
c	Rychlost světla ve vakuu	[m/s]
C_n^2	Strukturní parametr indexu lomu	[m ^{-2/3}]
Dn	Strukturní funkce indexu lomu	[-]
l	Průměr koule	[m]
l_0	Minimální průměr koule	[m]
L_0	Maximální průměr koule	[m]
$L_{const.}$	Mechanická délka	[m]
n	Index lomu	[-]
N	Počet vlnových délek	[-]
n_0	Střední hodnota indexu lomu	[-]
n_l	Náhodná odchylka od střední hodnoty	[-]
r	Vzdálenost	[-]
\mathbf{r}	Polohový vektor	[-]
SiO_2	Oxid křemičitý	[-]
t	Čas	[s]
TiO_2	Oxid titaničitý	[-]
ν	Optická frekvence	[Hz]
σ	Směrodatná odchylka	[nm]

PŘÍLOHA 1

Seznam vlastních publikací

- [H1] HRABINA, J., ZUCCO, M., PHILIPPE, C., PHAM, T. M., **HOLA, M.**, ACEF, O., LAZAR, J., CIP, O. Iodine Absorption Cells Purity Testing. *Sensors-Basel* 2017, 17, (1).
- [H2] **HOLA, M.**, HRABINA, J., MIKEL, B., LAZAR, J., CIP, O. Hollow-core photonic crystal fiber based optical frequency references. In *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, Mullerova, J.; Senderakova, D.; Ladanyi, L.; Scholtz, L., Eds. 2016; Vol. 10142.
- [H3] **HOLA, M.**, LAZAR, J., CIZEK, M., HUCL, V., RERUCHA, S., CIP, O. Coordinate interferometric system for measuring the position of a sample with infrared telecom laser diode. In *Optics and Measurement International Conference 2016*, Kovacicinova, J., Ed. 2016; Vol. 10151.
- [H4] HRABINA, J., SARBORT, M., **HOLA, M.**, CIP, O., LAZAR, J., ZUCCO, M., ACEF, O., DU-BURCK, F. Iodine Absorption Cells Quality Measurements. *2016 European Frequency and Time Forum (Eftf)* 2016.
- [H5] HRABINA, J., ZUCCO, M., **HOLA, M.**, SARBORT, M., ACEF, O., DU-BURCK, F. CIP, O., LAZAR, J. Iodine Absorption Cells Quality Evaluation Methods. In *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, Mullerova, J.; Senderakova, D.; Ladanyi, L.; Scholtz, L., Eds. 2016; Vol. 10142.
- [H6] RERUCHA, S., SARBORT, M., **HOLA, M.**, CIZEK, M., HUCL, V., CIP, O., LAZAR, J., Digital algorithms for parallel pipelined single-detector homodyne fringe counting in laser interferometry. In *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, Mullerova, J.; Senderakova, D.; Ladanyi, L.; Scholtz, L., Eds. 2016; Vol. 10142.
- [H7] SARBORT, M., RERUCHA, S., **HOLA, M.**, BUCHTA, Z., LAZAR, J. Self-referenced interferometer for form measurement of hollow cylinders. In *20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, Mullerova, J.; Senderakova, D.; Ladanyi, L.; Scholtz, L., Eds. 2016; Vol. 10142.
- [H8] SARBORT, M., RERUCHA, S., **HOLA, M.**, BUCHTA, Z., LAZAR, J. Self-referenced interferometer for cylindrical surfaces. *Applied Optics* 2015, 54, (33), 9930–9938.
- [H9] **HOLA, M.**, MIKEL, B., HRABINA, J., CIP, O., LAZAR, J. Preparation of optical frequency references based on gas filled hollow core photonics crystal fibers. In

Optical Measurement Systems for Industrial Inspection Ix, Lehmann, P.; Osten, W.; Albertazzi, G. A., Eds. 2015; Vol. 9525.

- [H10] **HOLA, M.**, HRABINA, J., SARBORT, M., OULEHLA, J., CIP, O., LAZAR, J. Contribution of the Refractive Index Fluctuations to the Length Noise in Displacement Interferometry. *Measurement Science Review* 2015, 15, (5), 263–267.
- [H11] **HOLA, M.**, CIP, O., SARBORT, M., LAZAR, J. Air flow and length noise in displacement interferometry. In *Optics and Measurement Conference 2014*, Kovacicinova, J.; Vit, T., Eds. 2015; Vol. 9442.
- [H12] LAZAR, J., **HOLA, M.**, HRABINA, J., OULEHLA, J., CIP, O., VYCHODIL, M., SEDLAR, P., PROVAZNIKOVA, P. Advanced interferometry systems for dimensional measurement in nanometrology. In *Optics and Measurement Conference 2014*, Kovacicinova, J.; Vit, T., Eds. 2015; Vol. 9442.
- [H13] MRNA, L., SARBORT, M. **HOLA, M.**, Deformable mirror for high power laser applications. In *Optics and Measurement Conference 2014*, Kovacicinova, J.; Vit, T., Eds. 2015; Vol. 9442.
- [H14] OULEHLA, J., **HOLA, M.**, HRABINA, J., LAZAR, J., CIP, O., VYCHODIL, M., SEDLAR, P., PROVAZNIKOVA, P. Industrial interferometry systems for multi-axis measurement. In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection Ix*, Lehmann, P.; Osten, W.; Albertazzi, G. A., Eds. 2015; Vol. 9525.
- [H15] **HOLA, M.**, HRABINA, J., CIP, O., FEJFAR, A., STUCHLIK, J., KOCKA, J., OULEHLA, J., LAZAR, J. Nanopositioning with detection of a standing wave. *Nanocon 2013, 5th International Conference* 2014, 792–796.
- [H16] **HOLA, M.**, LAZAR, J., CIP, O., BUCHTA, Z. In-beam tracking refractometry for coordinate interferometric measurement. In *Optical Micro- and Nanometrology V*, Gorecki, C.; Asundi, A. K.; Osten, W., Eds. 2014; Vol. 9132.
- [H17] HRABINA, J., LAZAR, J., KLAPETEK, P., CIP, O., CIZEK, M., **HOLA, M.**, SERY, M. Interferometric coordinates measurement system for local probe microscopy nanometrology. *Nanocon 2013, 5th International Conference* 2014, 797–802.
- [H18] HRABINA, J., SARBORT, M., ACEF, O., DU BURCK, F., CHIODO, N., **HOLA, M.**, CIP, O., LAZAR, J. Spectral properties of molecular iodine in absorption cells filled to specified saturation pressure. *Applied Optics* 2014, 53, (31), 7435–7441.
- [H19] HRABINA, J., SARBORT, M., ACEF, O., DU BURCK, F., CHIODO, N., CHEA, E., **HOLA, M.**, CIP, O., LAZAR, J. Spectral properties of iodine cells for laser standards. In *19th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, PopiolekMasajada, A.; Urbanczyk, W., Eds. 2014; Vol. 9441.
- [H20] LAZAR, J., **HOLA, M.**, FEJFAR, A., STUCHLIK, J., KOCKA, J., OULEHLA, J., CIP, O. Displacement measurement with intracavity interferometry. In *Optical*

Micro- and Nanometrology V, Gorecki, C.; Asundi, A. K.; Osten, W., Eds. 2014; Vol. 9132.

- [H21] **HOLA, M.**, BUCHTA, Z., CIP, O., LAZAR, J. Position sensing with suppression of the drift of the refractive index of air for high resolution interferometry. *2014 Xxxith Ursa General Assembly and Scientific Symposium (Ursa Gass)* 2014.
- [H22] HRABINA, J., LAZAR, J., KLAPETEK, P., VALTR, M., CIP, O., OULEHLA, J., CIZEK, M., **HOLA, M.**, SEREY, M. 6-axis interferometric coordinates measurement system for nanometrology. In *Photonic Instrumentation Engineering*, Soskind, Y. G.; Olson, C., Eds. 2014; Vol. 8992.
- [H23] LAZAR, J., **HOLA, M.**, CIP, O., HRABINA, J., FEJFAR, A., STUCHLIK, J., KOCKA, J. Interferometry in a passive Fabry-Perot cavity with the detection of a standing wave. *2014 Xxxith Ursa General Assembly and Scientific Symposium (Ursa Gass)* 2014.
- [H24] LAZAR, J., **HOLA, M.**, HRABINA, J., OULEHLA, J., CIP, O. Interferometry within a resonant cavity with standing wave detection. In *Second International Conference on Applications of Optics and Photonics*, Costa, M.; Nogueira, R. N., Eds. 2014; Vol. 9286.
- [H25] HRABINA, J., LAZAR, J., **HOLA, M.**, CIP, O. Frequency Noise Properties of Lasers for Interferometry in Nanometrology. *Sensors-Basel* 2013, 13, (2), 2206–2219.
- [H26] LAZAR, J., **HOLA, M.**, HRABINA, J., BUCHTA, Z., CIP, O. Interferometry with suppression of fast fluctuations of the refractive index of air for nanometrology. In *Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, Ye, S.; Fei, Y., Eds. 2013; Vol. 8916.
- [H27] **HOLA, M.**, CIP, O., HRABINA, J., BUCHTA, Z., LAZAR, J. Differential interferometry with suppression of the influence refractive index of air for nanometrology. *Nanocon 2012, 4th International Conference* 2012, 805–810.
- [H28] LAZAR, J., **HOLA, M.**, CIP, O., CIZEK, M., HRABINA, J., BUCHTA, Z. Displacement interferometry with stabilization of wavelength in air. *Optics Express* 2012, 20, (25), 27830–27837.
- [H29] LAZAR, J., **HOLA, M.**, CIP, O., CIZEK, M., HRABINA, J., BUCHTA, Z. Refractive Index Compensation in Over-Determined Interferometric Systems. *Sensors-Basel* 2012, 12, (10), 14084–14094.
- [H30] LAZAR, J., **HOLA, M.**, HRABINA, J., BUCHTA, Z., CIP, O., OULEHLA, J. Displacement measurement with over-determined interferometer. In *18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, Perina, J.; Nozka, L.; Hrabovsky, M.; Senderakova, D.; Urbanczyk, W., Eds. 2012; Vol. 8697.